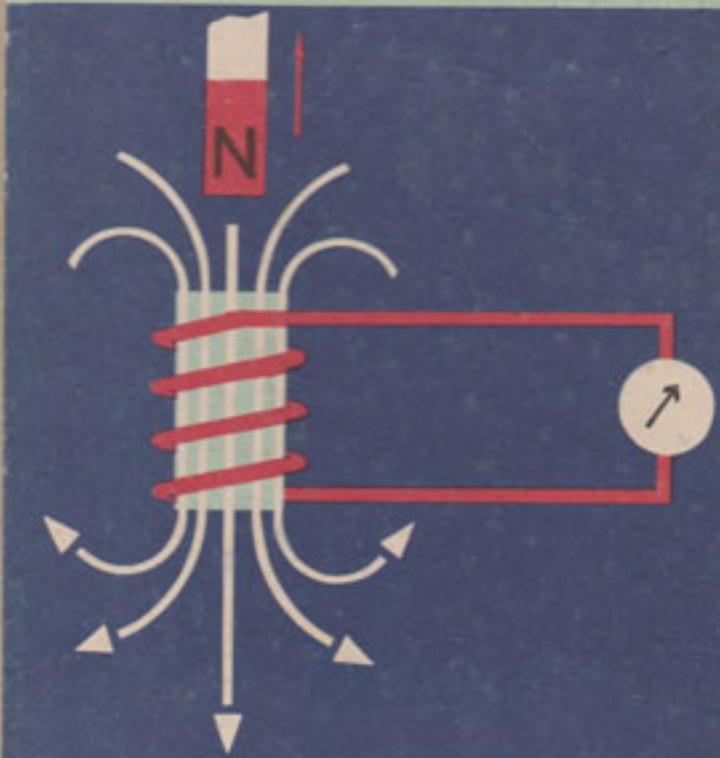
Fizica

Manual pentru anul III liceu

Secția reală



CUPRINS

1. Electrostatică

A. Fenomene fundamentale 5
B. Legea lui Coulomb 10
C. Cîmp electrostatic 16
D. Potențial electric 19
E. Interacțiunea între cîmp și substanță 25
F. Mașini electrostatice 28
G. Condensatori 29

2. Electrocinetică

A. Curentul electric de conducție și efectele lui 38
B. Legea lui Ohm 42
C. Curenți ramificați 50
D. Măsurarea rezistențelor electrice 58
E. Energie electrică 65
F. Curentul electric în electroliți. Electroliza și legile ei 72
G. Aplicațiile electrolizei 78

3. Electromagnetism

A. Cîmpul magnetic constant și acțiuni ale lui 81
B. Interacțiunea dintre cîmpul magnetic și substanță 100
C. Aplicații ale fenomenelor electromagnetice 103

4. Inducție electromagnetică

A. Tensiunea electromotoare indusă și legile ei 109
B. Autoinducție 116

5. Curent alternativ

A. Tensiuni electromotoare alternative 124
B. Circuite în curent alternativ 132

6. Mașini electrice rotative

A. Mașini de curent alternativ 146
B. Mașini de curent continuu 156

7. Transformatoare

8. Electrificare

9. Procese electronice în gaze și vid

A. Curentul electric în gaze 177
B. Fascicule de electroni 183
C. Fascicule de ioni 192
D. Plasmă 193

10. Tuburi electronice

A. Dioda 200
B. Trioda 204

11. Semiconductori

A. Curentul electric în semiconductori 209
B. Dioda semiconductoare 213
C. Tranzistorul 218

12. Oscilații și unde electromagnetice. Aplicații

A. Oscilații electrice 220
B. Unde electromagnetice 226
C. Radioemisie 233
D. Radiorecepție 236
E. Radiolocație 240
F. Mașini electronice de calcul 241
Anexă: Lucrări de laborator 248

1. Electrostatică

A. Fenomene fundamentale

1.1. Electrizarea prin frecare și prin contact. Frecăm o vergea de ebonită cu o blană de pisică (sau cu o împletitură din păr de iepure de Angora) și apropiem vergeaua de firișoare de măduvă de soc sau de bucățele mici de hîrtie. Firișoarele de măduvă de soc și bucățelele de hîrtie sînt atrase de vergeaua de ebonită.

Repetăm experiența, frecînd o vergea de sticlă cu o bucată de postav sau cu o bucată de piele. Observăm că și aceasta va atrage firișoarele de măduvă de soc și foițele de hîrtie.

Spunem că *prin frecare ebonita și sticla s-au electrizat.*

Fenomenele elementare de electrizare sînt cunoscute din antichitate. Thales din Milet (640—548 î.e.n.) a arătat că chihlimbarul frecat cu o bucată de stofă obține proprietatea de a atrage corpuri ușoare. Deoarece chihlimbarul în grecește se numește electron, cuvîntul „electrizare" denumește proprietatea observată.

Prin convenția stabilită de Benjamin Franklin (1706—1790), sticla s-a încărcat cu electricitate pozitivă, iar ebonita cu electricitate negativă.

Electrizarea unui corp poate fi mai ușor observată întrebuințînd pendulul electric, format dintr-o bobiță de măduvă de soc, fixată la capătul unui fir de mătase, suspendat de un suport cu picior izolator de sticlă (fig. 1.1). Apropiind vergeaua de sticlă electrizată de pendulul electric, bobița de soc va fi atrasă (fig. 1.1, *a*).

După ce bobița de soc se lipește un moment de vergeaua electrizată, ea este apoi respinsă (fig. 1.1, *b*). Prin atingere de vergeaua electrizată pozitiv, bobița de soc s-a electrizat tot pozitiv și, din această cauză, ele se resping. Observăm astfel că un corp se poate electriza și prin atingere, cînd ia o parte din sarcina electrică a corpului electrizat. O asemenea electrizare se numește electrizare prin

Scanned with OKEN Scanner

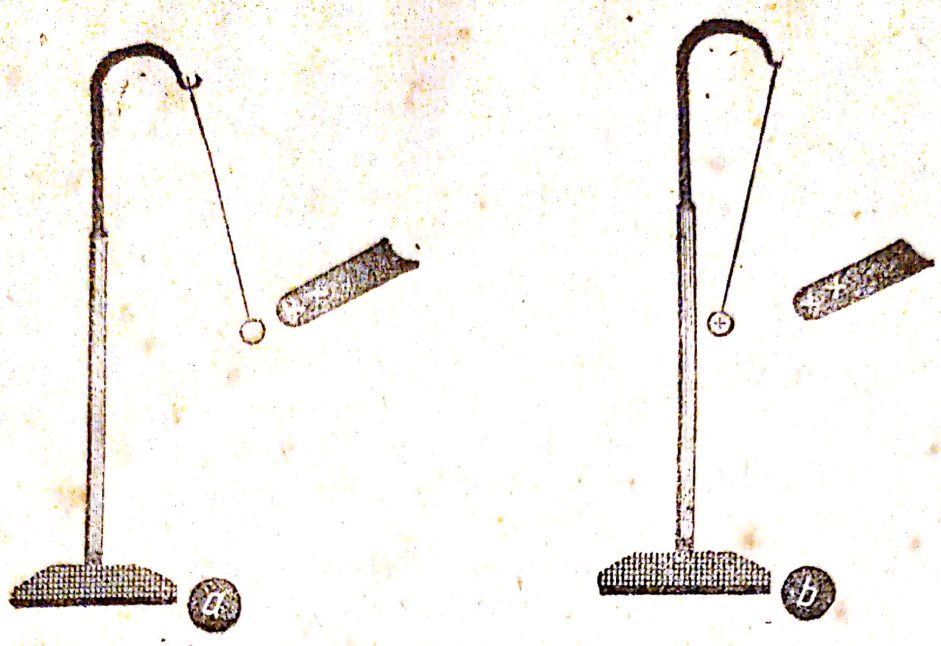


Fig. 1.1

contact. Prin contact, corpurile se electrizează cu același fel de electricitate. Totodată, experiența ne arată că două corpuri încărcate cu același fel de electricitate se resping.

Atracția și respingerea corpurilor electrizate pot fi ilustrate și în felul următor: Încărcăm bobița unui pendul electric cu electricitate pozitivă, iar bobița unui al doilea pendul electric cu electricitate negativă. Apropiind acum cele două pendule, observăm cum bobițele de soc se atrag (fig. 1. 2, *a*). Dacă încărcăm ambele pendule cu același fel de electricitate și le apropiem, bobițele de soc se resping (fig.1.2,*b*). Generalizînd, putem spune:

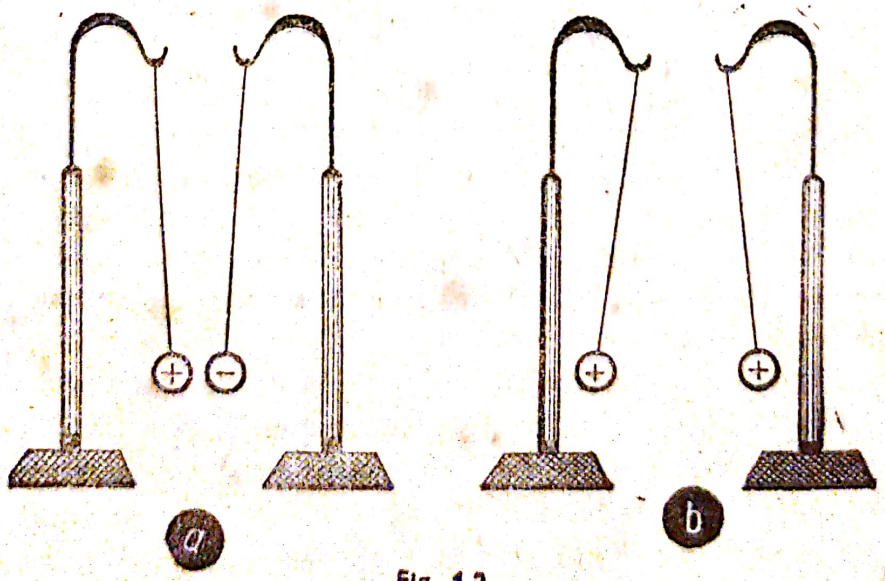


Fig. 1.2

● Corpurile încărcate cu același fel de electricitate se resping, iar cele încărcate cu electricitate de semn contrar se atrag.

1.2. Corpuri bune conducătoare și corpuri rele conducătoare de electricitate. *Experiență.* Frecăm o vergea de ebonită cu blană de pisică numai la unul din capete. Apropiind-o de un pendul electric, observăm că numai regiunea frecată atrage bobița de soc, ceea ce înseamnă că electricitatea ce a luat naștere pe vergeaua electrizată prin frecare nu se răspîndește pe toată vergeaua, ci rămîne localizată numai în regiunea frecată.

La fel se comportă sticla, parafina, mica, sulful. Ele sînt deci rele conducătoare de electricitate și de aceea se numesc *izolatoare* sau *dielectrici.*

Dacă încercăm să electrizăm prin frecare o vergea de alamă ținută în mînă, constatăm că ea nu atrage bobița de soc a pendulului electric. Dacă însă fixăm vergeaua de alamă pe un mîner izolator și, ținînd-o de mîner, o frecăm cu o bucată de mătase, constatăm că vergeaua de alamă se electrizează și atrage bobița de soc a pendulului electric. Observăm, în același timp, că electricitatea nu rămîne localizată numai în regiunea frecată, ci se răspîndește pe toată vergeaua metalică. Asemenea corpuri sînt bune conducătoare de electricitate și se numesc *conductoare electrice.* În această categorie intră, în general, toate metalele și aliajele lor. Pămîntul, grafitul, soluțiile de acizi, baze sau săruri, corpul omenesc sînt, de asemenea, conductoare. Aerul și, în general, gazele în stare uscată și în condiții normale de presiune și temperatură sînt izolatoare electrice.

Între corpurile conductoare și izolatoare există o întreagă clasă de corpuri mai puțin conductoare, numite *semiconductoare.* Semiconductoarele au fost studiate abia în ultimul timp și au căpătat o mare importanță științifică și tehnică.

Trebuie să se observe că în anumite condiții semiconductoarele și izolatoarele pot prezenta proprietăți conductoare, după cum se va vedea mai tîrziu.

1.3. Interpretarea electronică a electrizării. Fenomenele electrice au putut fi interpretate corect numai după descoperirea electronului. Electronul este o particulă elementară care intră în alcătuirea corpurilor și constituie, în același timp, sarcina elementară de electricitate negativă.

Electronii gravitează în jurul nucleelor atomice pe diferite orbite, numărul electronilor sateliți fiind egal cu numărul protonilor din nucleu. Fiecare proton este purtătorul unei sarcini electrice pozitive, egală și de semn contrar cu sarcina unui electron. Sarcinile electrice pozitive din nucleul atomului sînt neutralizate de sarcinile negative ale electronilor sateliți și atomul este neutru din punct de vedere electric. Masa electronului în repaus ($m \approx 9{,}10 \cdot 10^{-31}$ kg) este de aproximativ 1 837 de ori mai mică decît masa atomului de hidrogen, care, după cum știm, este cel mai ușor atom din natură.

Cînd frecăm un baston de sticlă cu o bucată de postav, o parte din atomii de pe suprafața bastonului de sticlă pierd din electronii lor periferici, care trec pe bucata de postav. Sticla se încarcă astfel cu electricitate pozitivă, deoarece un număr de atomi din moleculele sticlei au sarcinile electrice pozitive din nucleu

necompensate, iar postavul se încarcă cu electricitate negativă, din cauza surplusului de electroni pe care îi conține. Cînd frecăm bastonul de ebonită cu blană de pisică, un număr de electroni de pe blana de pisică trec pe bastonul de ebonită, și astfel bastonul de ebonită se încarcă negativ, în timp ce blana se încarcă pozitiv. Din această cauză, în timpul electrizării apar întotdeauna ambele feluri de sarcini electrice în cantități egale.

- Electrizarea pozitivă corespunde unei pierderi de electroni, iar electrizarea negativă corespunde unui adaos de electroni liberi.

Corpurile conductoare și corpurile izolatoare se deosebesc între ele prin microstructura lor. Conductoarele au, în general, o structură cristalină, adică atomii sînt astfel dispuși încît nucleele lor se găsesc în nodurile unei rețele cristaline spațiale (fig. 1. 3). În această structură, atomii sînt atît de apropiați între ei, încît orbitele electronilor periferici se întrepătrund. Legătura dintre acești electroni periferici și nucleul lor devine atît de slabă încît ei pot trece de pe orbita unui atom pe orbita altuia vecin și deci electronii se pot deplasa în interiorul metalului. Cu acest înțeles se vorbește de faptul că electronii se mișcă „dezordonat" printre nodurile rețelei cristaline.

Atomii care au pierdut unul sau mai mulți electroni se numesc *ioni*. Deci, în metale, nodurile rețelei cristaline sînt formate din ioni pozitivi, printre care se mișcă electronii liberi. Electronii liberi aparțin astfel întregului conductor.

Deși conductoarele conțin electroni liberi, ele sînt totuși neutre din punct de vedere electric, deoarece numărul electronilor liberi este egal cu numărul sarcinilor pozitive ale ionilor.

Conductoarele ținute în mînă nu pot fi electrizate prin frecare, deoarece electronii smulși sînt imediat înlocuiți cu alții, care vin din pămînt prin corpul nostru. Rezerva de electroni liberi din pămînt este atît de mare, încît schimbul de electroni care are loc cînd punem un corp electrizat în contact cu pămîntul nu poate modifica starea neutră a pămîntului. Ținut însă de un mîner izolator, conductorul se va putea electriza prin frecare sau prin contact, deoarece i se pot smulge sau i se pot adăuga electroni. Datorită mobilității electronilor liberi (între două ciocniri consecutive de ionii rețelei cristaline, viteza lor este de ordinul sutelor de km/s), deficitul de electroni, în cazul în care conductorul se încarcă pozitiv, sau surplusul de electroni, cînd conductorul se încarcă negativ, se repartizează imediat pe întregul conductor. De aceea, pe un conductor electrizat, electricitatea nu se localizează numai în anumite regiuni, ci se răspîndește pe întregul conductor.

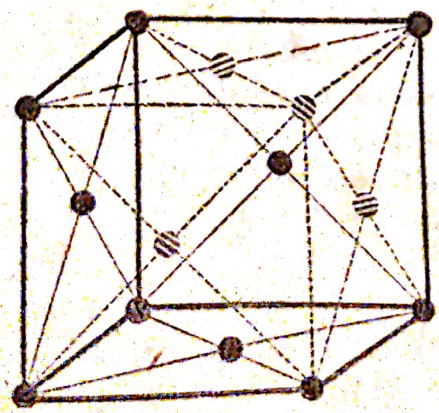
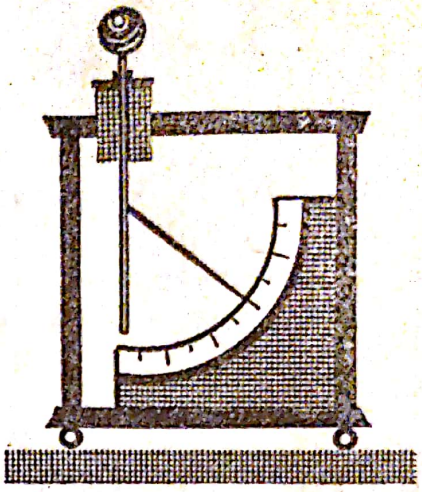


Fig. 1.3

Izolatoarele (dielectricii) nu au electroni liberi și din această cauză, prin ele nu pot circula sar-

cinile electrice. Surplusul de electroni, adăugați unui dielectric în timpul electrizării negative, nu se poate răspîndi prin dielectric, iar cînd corpul se electrizează pozitiv, el pierde electroni dintr-o anumită regiune, iar ceilalți electroni nu le pot lua locul, și astfel distribuția electronilor rămîne neuniformă, adică unele regiuni rămîn mai departe neutre, iar alte regiuni rămîn electrizate.

Studiul electricității se face în două capitole mari: electrostatica — studiază fenomenele produse de sarcini electrice în echilibru, și electrocinetica, în care se studiază fenomenele produse de trecerea curentului electric prin conductoare.



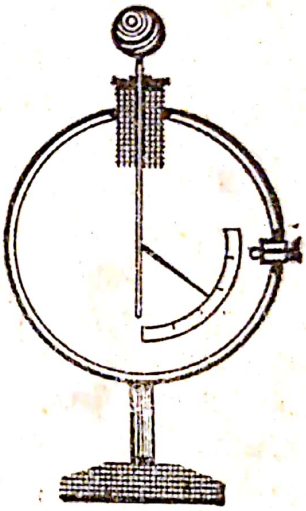


Fig. 1.4

1.4. Recunoașterea stării electrice. Electroscopul. Am văzut la § 1.1 că electrizarea unui corp poate fi stabilită cu ajutorul pendulului electric. Totuși acesta este un dispozitiv puțin sensibil pentru determinarea stării electrice și a semnului sarcinii electrice a unui corp electrizat, mai ales cînd corpul conține o cantitate mică de electricitate.

Un dispozitiv mult mai sensibil pentru determinarea stării electrice este electroscopul. Un electroscop este format dintr-o vergea metalică, terminată la partea inferioară cu o lamă. La partea inferioară a lamei sînt lipite una sau două foițe subțiri de aur sau de staniol. Vergeaua se termină la partea superioară cu o mică sferă metalică, care împiedică scurgerea electricității în atmosferă. Vergeaua cu foița de aur este închisă într-o cutie cu pereții de sticlă (fig. 1. 4). Dacă pereții laterali ai electroscopului sînt metalici și sînt legați de pămînt, sensibilitatea electroscopului este mai mare. Vergeaua electroscopului trebuie să fie bine izolată de peretele cutiei. Lucrul acesta se realizează cu ajutorul unui dop de dielectrină* sau din materiale plastice izolatoare.

Se poate încărca electroscopul cu electricitate atingînd sfera electroscopului cu un corp electrizat. Dacă îl atingem cu bastonul de ebonită (electrizat negativ), o parte din surplusul de electroni de pe baston trece în electroscop. După îndepărtarea bastonului, electronii rămași în electroscop se răspîndesc în toată vergeaua conductoare și determină astfel o forță de respingere între lamă și foiță.

---

* Dielectrina este un amestec de sulf și parafină, topite împreună într-un anumit raport. Acest izolator foarte bun a fost preparat de fizicianul român Dragomir Hurmuzescu. Electroscopul cu dielectrină al lui Hurmuzescu a fost întrebuințat de soții Curie pentru determinarea radioactivității diferitelor minereuri și substanțe radioactive.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă atingem electroscopul cu un baston de sticlă electrizat pozitiv, electroscopul se încarcă și el pozitiv: un număr de electroni liberi din vergeaua electroscopului trec pe bastonul de sticlă și astfel sarcinile electrice pozitive de pe lama și foița electroscopului, rămase necompensate, creează o forță de respingere, și foița electroscopului deviază.

Deci, un electroscop se poate încărca prin contact dacă este atins cu un corp electrizat. În acest caz, el se încarcă cu același fel de electricitate cu aceea a corpului electrizat cu care a fost atins.

3. Legea lui Coulomb

1.5. **Legea atracției și respingerii electrostatice.** În anul 1687, Newton a descoperit legea atracției universale, care stabilește că două corpuri punctiforme se atrag direct proporțional cu masele lor și invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele, lege care se exprimă matematic prin formula:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Am văzut însă că și între corpurile electrizate există forțe de interacțiune, adică forțe de atracție și forțe de respingere, electrostatice. Aceste fapte l-au determinat pe fizicianul francez Charles Coulomb (1736—1806) să extindă legea atracției universale și asupra forțelor de interacțiune electrostatică.

- **Modulul forței de interacțiune (de atracție sau de respingere) dintre două corpuri electrizate, de dimensiuni foarte mici în raport cu distanța dintre ele, este direct proporțional cu produsul sarcinilor electrice și invers proporțional cu pătratul depărtării dintre centrele corpurilor electrizate.**

Această lege a fost verificată experimental și s-a dovedit a fi exactă atît în cazul corpurilor de dimensiuni obișnuite cît și în microcosmosul atomic.

Se constată însă că modulul forței de interacțiune electrostatică depinde și de proprietățile mediului în care se găsesc corpurile electrizate. De aceea relația matematică care exprimă legea lui Coulomb în SI se scrie:

$$\boxed{F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^2}} \qquad (1)$$

în care q_1 și q_2 sînt sarcinile electrice cu care sînt încărcate corpurile electrizate, iar r este depărtarea dintre centrele lor. Constanta ε (epsilon) se numește *permitivitatea absolută a mediului*. Ea caracterizează proprietățile electrice ale mediului.

Scanned with OKEN Scanner

Se observă că într-un mediu oarecare, forța care se exercită între două sarcini electrice este cu atît mai mică cu cît ε este mai mare.

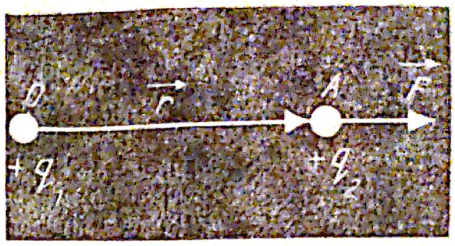


Fig. 1.5

Legea lui Coulomb poate fi scrisă și vectorial. Pentru aceasta considerăm originea sistemului de referință în centrul sarcinii $+q_1$. Poziția sarcinii $+q_2$ este determinată de vectorul de poziție $\vec{r}$, iar forța de respingere va fi reprezentată prin vectorul $\vec{F}$, coliniar și de același sens cu vectorul $\vec{r}$ (fig. 1. 5). În acest caz, vectorul $\vec{F}$ poate fi exprimat sub forma unui produs dintre un scalar a și vectorul $\vec{r}$, adică:

$$\vec{F} = a\vec{r}.$$

Pentru a determina valoarea lui a scriem ecuația sub formă scalară:

$F = ar$, de unde: $a = \frac{F}{r}$,

în care $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^2}$, așa că: $a = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^3}$,

ceea ce ne permite să scriem:

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^3}\vec{r}, \qquad (1')$$

care este expresia vectorială a legii lui Coulomb. În cazul respingerii electrostatice, vectorii $\vec{F}$ și $\vec{r}$ sînt îndreptați în același sens, iar dacă sarcinile sînt de semn contrar, atunci $\vec{F}$ și $\vec{r}$ au sensuri contrare.

Se înțelege că, potrivit legii acțiunii și reacțiunii, forța pe care o exercită sarcina q_1 asupra sarcinii q_2 este egală și de sens opus forței cu care q_2 acționează asupra sarcinii q_1.

1.6. Permitivitatea electrică. După cum am văzut, intensitatea forței de interacțiune dintre corpurile electrizate depinde și de proprietățile electrice ale mediului, caracterizat prin permitivitatea sa electrică. În vid forța de interacțiune electrică este maximă, ceea ce înseamnă că permitivitatea electrică absolută a vidului este minimă.

În Sistemul Internațional de unități, permitivitatea absolută a vidului are valoarea:

$$\varepsilon_0 = 8{,}856 \cdot 10^{-12} \text{ farad/metru}^* \left(\frac{\text{F}}{\text{m}}\right).$$

* Justificarea denumirii unității $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ se face la § 1.22.

Permitivitatea absolută este o mărime a cărei valoare depinde de sistemul de unități în care o exprimăm.

În tabele găsim, de obicei, permitivitatea relativă.

Se numește permitivitate relativă raportul dintre permitivitatea absolută a mediului și permitivitatea absolută a vidului. Adică:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}. \qquad (2)$$

Permitivitatea relativă este deci un număr (fără dimensiuni) avînd aceeași valoare în orice sistem de unități. Ea ne arată de cîte ori forța de interacțiune în vid este mai mare decît forța de interacțiune într-un anumit mediu. În adevăr, dacă scriem legea lui Coulomb pentru vid și pentru un mediu oarecare:

$$F_0 = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \text{ și } F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon r^2},$$

rezultă că:

$$\frac{F_0}{F} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r.$$

Din cele arătate pînă acum înseamnă că permitivitatea relativă a vidului este egală cu unitatea, iar a celorlalte medii este mai mare decît 1.

Dăm mai jos valoarea permitivității relative a cîtorva medii:

Solide		Lichide		Gaze	
Parafină	2	Petrol	2	Heliu	1,00007
Ebonită	2,7	Ulei de transformator	2,5	Hidrogen	1,0003
Sulf	3,6—4,3	Anilină	7,2	Aer	1,0006
Sticlă	5—7	Alcool etilic	26	Bioxid de carbon	1,001
Porțelan	6	Apă	81		
Mică	6				

Observăm că permitivitatea relativă a gazelor diferă foarte puțin de unitate, ceea ce înseamnă că, practic, forțele coulombiene în aer uscat sînt sensibil egale cu acelea care se exercită în vid.

Observație. Dacă ținem seama că $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ rezultă că:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r,$$

iar formula lui Coulomb poate fi scrisă și sub forma:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r r^2},$$

Scanned with OKEN Scanner

în care $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ este o constantă a cărei valoare în SI este:

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = \frac{1}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}856 \cdot 10^{-12}} \approx 9 \cdot 10^9.$$

Vom putea scrie:

$$\boxed{F = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_r r^2}} \qquad (1'')$$

în care F se exprimă în newtoni (unitatea SI de forță), q_1 și q_2 în coulombi, iar r în metri.

1.7. Unitatea de sarcină electrică. În Sistemul Internațional cantitatea de electricitate este o mărime derivată. Unitatea de cantitate de electricitate se numește *coulomb* (C). Un coulomb este egal cu un amper × secundă. Adică:

$$1\text{C} = 1\text{A} \times 1\text{s}^*.$$

Un coulomb corespunde unui anumit număr de sarcini electrice elementare. Măsurători exacte au stabilit că sarcina electrică a unui electron este:

$$e = -1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \approx -1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C},$$

ceea ce înseamnă că o cantitate de electricitate negativă de un coulomb cuprinde:

$$\frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 625 \cdot 10^{16} \text{ electroni.}$$

În fenomenele în care intervin cantități mici de electricitate se folosesc, de obicei, multiplii coulombului, care, ca și multiplii altor unități, sînt formați cu ajutorul prefixelor incluse în tabelul următor:

Prefix		Factorul multiplicator al unității	Simbol
tera	10^{12}	1 000 000 000 000	T
giga	10^9	1 000 000 000	G
mega	10^6	1 000 000	M
kilo	10^3	1 000	k
hecto	10^2	100	h
deca	10^1	10	da
deci	10^{-1}	0,1	d
centi	10^{-2}	0,01	c
mili	10^{-3}	0,001	m
micro	10^{-6}	0,000 001	μ
nano	10^{-9}	0,000 000 001	n
pico	10^{-12}	0,000 000 000 001	p
femto	10^{-15}	0,000 000 000 000 001	f
atto	10^{-18}	0,000 000 000 000 000 001	a

* După cum se știe din școala generală, amperul este unitatea de intensitate a curentului electric, în SI.

Scanned with OKEN Scanner

Probleme rezolvate

1. *a)* Să se calculeze forța de interacțiune dintre două sarcini electrice de un coulomb fiecare, aflate în vid la un metru depărtare una de alta.
b) La ce depărtare trebuie să se găsească aceste sarcini în vid pentru a se respinge cu o forță de 10 N?
Soluție:
a) Din formula lui Coulomb rezultă:

$$F_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_r r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 1}{1 \cdot 1^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N}.$$

Așadar, două sarcini electrice de cîte 1 C fiecare, aflate în vid la 1 m depărtare, se resping cu o forță de 9 miliarde de newtoni.
b) Din formula lui Coulomb vom scoate valoarea lui r:

$$F_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q_2}{r^2}, \text{ de unde: } r^2 = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q_2}{F_0}.$$

Înlocuind datele numerice găsim:

$$r^2 = 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 1}{10} = 9 \cdot 10^8,$$

iar:

$$r = \sqrt{9 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^4 \text{ m}.$$

Deci, pentru a se respinge cu o forță de 10 N, două sarcini de cîte 1 C fiecare vor trebui să se găsească în vid la 30 km depărtare.
Din acest exemplu se vede că un coulomb reprezintă o cantitate foarte mare de electricitate. În fenomenele electrostatice intervin sarcini electrice cu mult mai mici.

2. Un pendul dublu este format din două bobițe de soc, cu masa de 0,6 g fiecare, suspendate de cîte un fir de mătase de 7,5 cm lungime. Încărcate deodată, prin atingere, cu același fel de electricitate, bobițele se resping cu o forță care le depărtează la 9 cm una de alta. Cu ce cantitate de electricitate au fost încărcate cele două bobițe de soc?
Datele problemei:

$m = 0{,}6 \text{ g} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ kg};$

$l = 7{,}5 \text{ cm} = 7{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ m};$

$r = 9 \text{ cm} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ m};$

$\varepsilon_r = 1.$

Soluție: Forța de respingere dintre bobițele electrizate este dată de legea lui Coulomb:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_r r^2},$$

în care $q_1 = q_2 = q$, iar $\varepsilon_r \approx 1$.

Deci: $F = 9 \cdot 10^9 \frac{q^2}{r^2}$ de unde: $q = \frac{r\sqrt{F}}{3 \cdot 10^4 \sqrt{10}}$.

Scanned with OKEN Scanner

Forța de respingere $\vec{F}$ și greutatea $\vec{G}$ a bobiței se compun și dau naștere rezultantei $\overrightarrow{AC}$ (fig. 1.6), după direcția în care se întinde firul. Prin urmare, triunghiurile ABC și ODA sînt asemenea. Din asemănarea lor rezultă:

$$\frac{F}{\frac{r}{2}} = \frac{G}{\sqrt{l^2 - \left(\frac{r}{2}\right)^2}}$$

de unde scoatem valoarea lui $\vec{F}$:

$$F = \frac{rG}{2\sqrt{l^2 - \left(\frac{r}{2}\right)^2}} = \frac{rmg}{\sqrt{4l^2 - r^2}}.$$

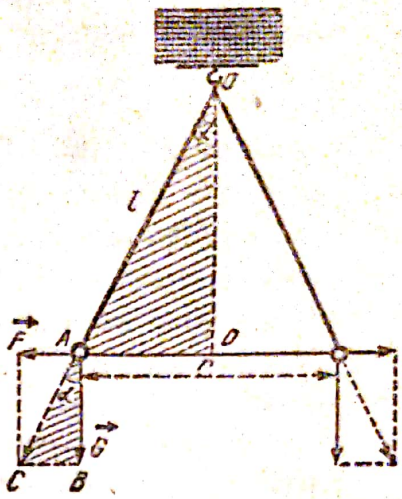


Fig. 1.6

Ținînd seama de valorile numerice găsim:

$$F = \frac{9 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}8}{\sqrt{4(7{,}5 \cdot 10^{-2})^2 - (9 \cdot 10^{-2})^2}} = 441 \cdot 10^{-5}\ \text{N}.$$

Înlocuim această valoare în expresia dedusă din legea lui Coulomb:

$$q = \frac{r\sqrt{F}}{3 \cdot 10^4 \sqrt{10}} = \frac{9 \cdot 10^{-2}\sqrt{441 \cdot 10^{-5}}}{3 \cdot 10^4 \sqrt{10}} = 63 \cdot 10^{-9}\ \text{C}.$$

Observăm că sarcina electrică acumulată pe bobița de soc este foarte mică, fiind abia de 63 miliardimi de coulomb.

Probleme

1. Cu ce forță se atrag două sarcini electrice de $-5\mu C$ și $+4\mu C$, cînd se găsesc în petrol la 30 cm depărtare una de alta?

Răspuns: $F = -1$ N.

2. Cu ce cantitate de electricitate trebuie încărcate două conductoare punctiforme pentru a se respinge cu o forță de 1 N, cînd se găsesc în vid la 1 m depărtare una de alta?

Răspuns: $q = 1{,}05 \cdot 10^{-5}$ C.

3. Două sarcini electrice egale cu cîte $10\mu C$ fiecare se găsesc în vid la 10 cm depărtare una de alta. Cu ce forță se resping?

Răspuns: $F = 90$ N.

4. Două sarcini punctiforme încărcate cu aceeași cantitate de electricitate se resping în vid la 5 cm depărtare. La ce depărtare ar trebui să fie așezate în ulei de transformator pentru a se respinge cu aceeași forță? Să se generalizeze problema.

Răspuns: $x = 3{,}16$ cm; $x = \frac{r}{\sqrt{\varepsilon_r}}$.

5. Două bobițe de soc avînd fiecare masa de 0,4 g, suspendate de cîte un fir de mătase de 10 cm lungime și încărcate deodată cu aceeași cantitate de electricitate, se resping la o distanță de 12 cm. Cu ce cantitate de electricitate au fost încărcate bobițele de soc?

Răspuns: $q_1 = q_2 = 68{,}6 \cdot 10^{-9}$ C.

6. Cu ce forță se resping doi electroni care se găsesc la 10^{-10} cm depărtare unul de altul?

Răspuns: $F = 23{,}04 \cdot 10^{-4}$ N.

C. Cîmp electrostatic

1.8. Intensitatea cîmpului electrostatic. Un corp electrizat își manifestă prezența prin forțele de atracție sau de respingere cu care acționează asupra altor corpuri electrizate aflate în apropierea lui. Faptul acesta este datorit cîmpului electrostatic, numit și cîmp coulombian, care ia naștere în jurul oricărei sarcini electrice.

Așadar: orice sarcină electrică creează în jurul ei un cîmp electrostatic prin care se transmit acțiunile electrostatice. *Cîmpul electrostatic este un aspect al materiei.*

Să considerăm o sarcină punctiformă $+Q$ care creează în jurul ei un cîmp electrostatic. Din această cauză, sarcina electrică $+q$ aflată în cîmp la distanța r de sarcina Q va fi respinsă cu o forță F conform legii lui Coulomb:

$$F = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2}.$$

- Se numește intensitate a cîmpului electrostatic într-un punct și se notează cu E raportul dintre intensitatea forței F și sarcina q aflată în acel punct din cîmp. Adică:

$$\boxed{E = \frac{F}{q}.} \qquad (1)$$

Aceasta înseamnă că intensitatea cîmpului electrostatic este mărimea fizică numeric egală cu forța electrostatică care acționează asupra unității de sarcină aflată în punctul considerat din cîmpul electrostatic. În adevăr, dacă $q = 1$, atunci $E = F$.

Dacă în formula de definiție a intensității cîmpului electrostatic înlocuim forța cu valoarea ei dată de legea lui Coulomb, obținem:

$$E = \frac{\frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2}}{q}$$

de unde:

$$\boxed{E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2},} \qquad (2)$$

ceea ce înseamnă că intensitatea cîmpului electrostatic într-un punct oarecare este direct proporțională cu sarcina electrică punctuală care îl creează și variază invers proporțional cu pătratul depărtării de această sarcină.

În același timp se constată că într-un mediu oarecare, intensitatea cîmpului electrostatic este mai mică decît în vid, și anume, cu atît mai mică cu cît permitivitatea mediului este mai mare.

Scanned with OKEN Scanner

Ținînd seama că $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ și înlocuind constanta $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ prin valoarea ei, formula în SI a intensității cîmpului electrostatic va putea fi scrisă sub forma simplificată:

Fig. 1.7

$$\boxed{E = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\varepsilon_r r^2}.} \qquad (2')$$

În SI, intensitatea cîmpului electrostatic se măsoară în volt pe metru (V/m)*.

Ecuația (1) ne permite să calculăm direct forța care acționează asupra unei sarcini electrice q aflate într-un cîmp electrostatic de intensitate cunoscută E. În adevăr, putem scrie că:

$$\boxed{F = qE,} \qquad (3)$$

în care F se măsoară în newtoni, q în coulombi, iar E în volți pe metru.

Intensitatea cîmpului electrostatic este o mărime vectorială, de aceea se reprezintă printr-un vector $\vec{E}$ îndreptat în sensul în care s-ar deplasa sarcina electrică pozitivă aflată în cîmp, în acel punct (fig. 1.7).

Observație. Ținînd seama de caracterul vectorial al mărimilor care intervin, formula (3) se poate scrie:

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E}.} \qquad (3')$$

Această formulă este asemănătoare cu formula fundamentală a mecanicii, aplicată la cîmpul gravitațional:

$$\vec{G} = m\vec{g},$$

în care $\vec{G}$ este forța care acționează în cîmpul gravitațional asupra unui corp de masă m, iar accelerația gravitației $\vec{g}$ corespunde intensității cîmpului gravitațional.

1.9. Liniile de cîmp în cîmpul electrostatic. Cîmpul electrostatic se caracterizează prin existența liniilor de cîmp. *Se numește linie de cîmp curba tangentă în orice punct vectorului $\vec{E}$, intensitate a cîmpului electric* (fig. 1.8).

Se ia ca sens al liniilor de forță sensul vectorului $\vec{E}$. De aceea, liniile de cîmp pleacă radial dintr-un corp încărcat pozitiv (fig. 1.9, *a*) și converg radial spre

* Justificarea este dată la § 1.14.

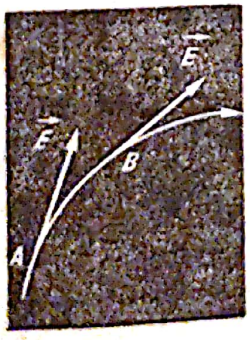


Fig. 1.8

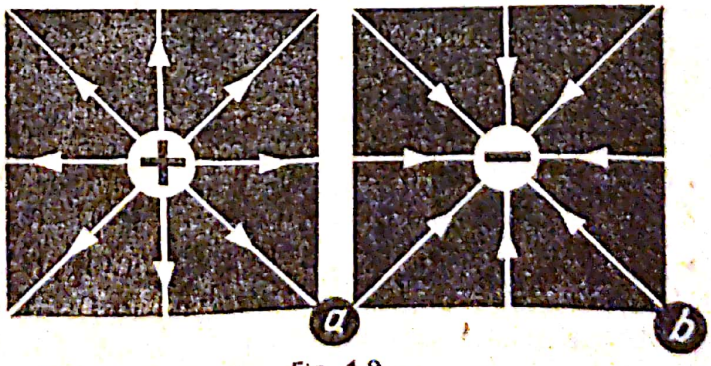


Fig. 1.9

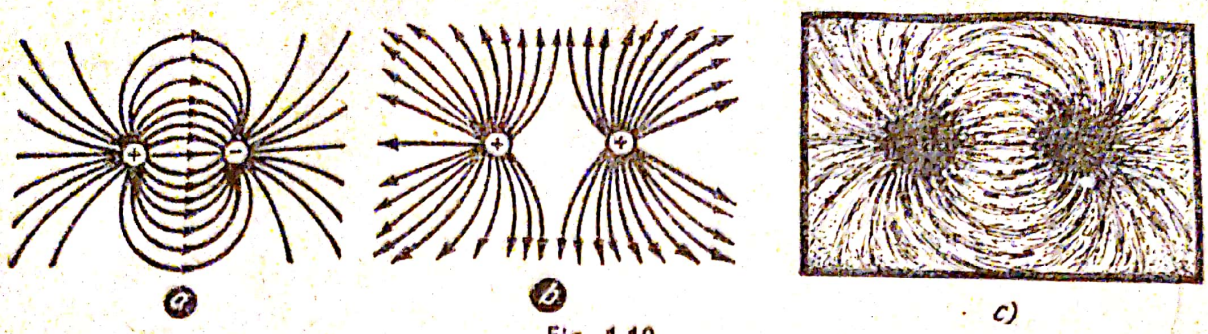


Fig. 1.10

un corp încărcat negativ (fig. 1.9, *b*). Deci, o sarcină electrică punctuală pozitivă poate fi considerată ca punctul de unde încep liniile de cîmp electric, iar sarcina punctuală negativă, locul unde sfîrșesc liniile de cîmp electric.

Pe un conductor electrizat de formă oarecare, liniile de cîmp sînt perpendiculare pe suprafața conductorului, iar în cîmpul electrostatic, ele nu se întretaie. De aceea, în cîmpurile electrostatice create de sarcini electrice diferite, liniile de cîmp sînt linii curbe, care se îndreaptă de la corpurile încărcate pozitiv spre cele încărcate negativ (fig. 1.10, *a*). Liniile de cîmp produse de două sarcini încărcate cu același fel de electricitate se observă în figura 1.10, *b*.

Un cîmp electrostatic uniform se caracterizează prin linii de cîmp paralele și echidistante. Un asemenea cîmp electrostatic uniform se formează între două plăci paralele, apropiate, încărcate cu cantități de electricitate egale, dar de semn contrar (fig. 1.11).

Liniile de cîmp ale cîmpului electrostatic se pot face vizibile în felul următor: Pe o placă de sticlă se lipesc două rondele de staniol. Se încarcă rondelele cu electricitate de semn contrar, punîndu-le în legătură cu cei doi poli ai unei mașini electrostatice. Se presară apoi pe sticlă firișoare scurte de păr, bine uscate (tăiate dintr-o perie) sau mici cristale aciforme de ghips. Firișoarele se orientează după direcția liniilor de cîmp (fig. 1.10, *c*), formînd un spectru al liniilor de cîmp ale cîmpului electrostatic.

În interiorul unui conductor nu există sarcini electrice. Ele se repartizează numai pe suprafața acestuia. Acest fapt se poate observa cu ajutorul dispozitivului din figura 1.12.

De aceea, în interiorul conductoarelor electrizate nu există linii de cîmp; în aceste regiuni cîmpul electrostatic este nul.

Acest fenomen este folosit pentru ecranarea electrică a unor dispozitive, adică pentru protejarea lor de acțiunea cîmpului electric exterior. Ecranarea conductoarelor electrizate poate fi demonstrată experimental, dacă acoperim un electroscop încărcat cu o cușcă de sîrmă, numită cușca lui Faraday (fig. 1.13). Apropiind de cușca de

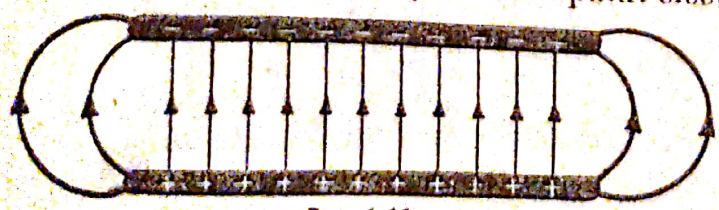


Fig. 1.11

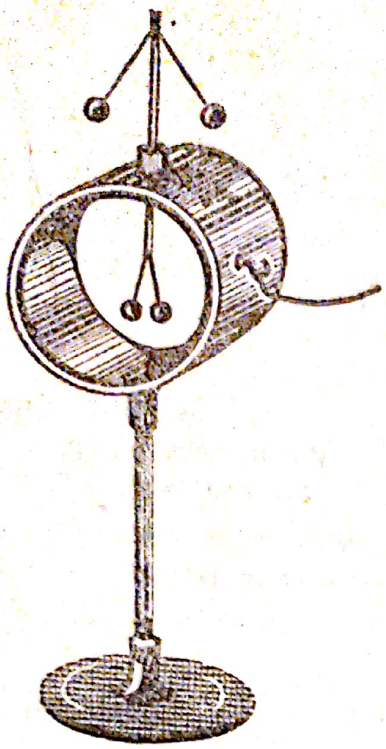


Fig. 1.12

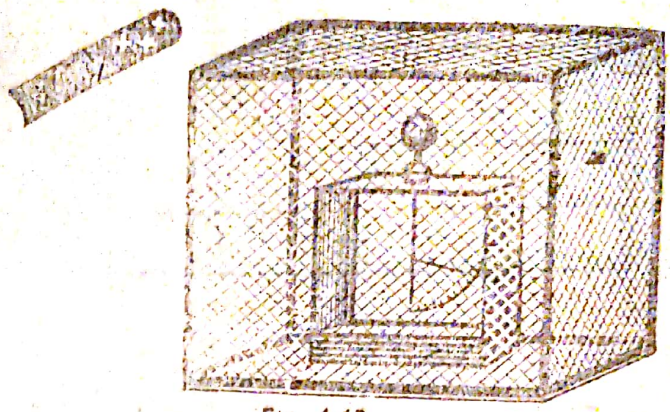


Fig. 1.13

sîrmă un baston de sticlă electrizat, observăm că foița electroscopului nu-și schimbă deviația.

1.10. Presiunea electrostatică. Proprietatea vîrfurilor ascuțite. Sarcinile electrice de pe conductoarele electrizate sînt respinse de către sarcinile vecine; de aceea pe suprafața conductoarelor electrizate se creează o presiune electrostatică.

Presiunea electrostatică este mult mai mare la vîrfuri, unde cantitatea de electricitate este mai mare. Din această cauză, electricitatea se scurge prin vîrfuri. De aceea, piesele conductoare ale corpurilor supuse electrizării nu trebuie să aibă vîrfuri ascuțite, ci să fie întotdeauna terminate prin sfere conductoare, pentru a împiedica scurgerea electricității.

Întrebări

1. Cum s-ar putea calcula forța ce acționează asupra unei sarcini electrice aflate în cîmpul electric creat de mai multe sarcini? Reprezentare geometrică.
2. Ce se înțelege prin intensitatea cîmpului electrostatic?
3. Se poate calcula în mod asemănător (pct. 1), cîmpul electric rezultant?
4. Cum se pot face vizibile liniile de forță ale cîmpului electrostatic?

P.7.

D Potențial electric

1.11. Lucrul mecanic al forțelor electrice. Am văzut că în jurul unui corp electrizat se găsește un cîmp electrostatic în care sarcinile electrice se deplasează. Pentru deplasarea unei sarcini electrice, cîmpul electrostatic efectuează un lucru mecanic.

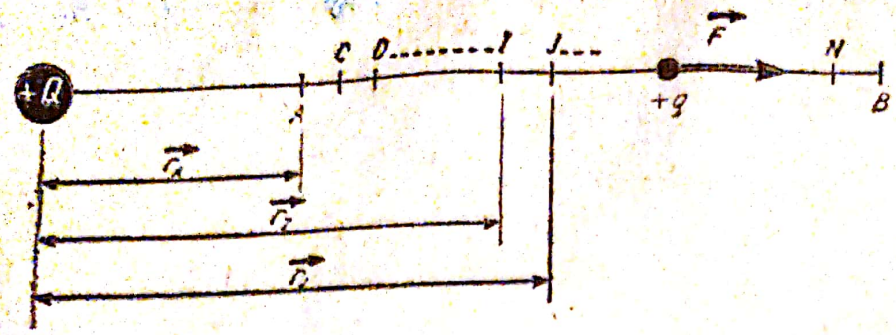


Fig. 1.14

Să considerăm o sarcină electrică $+Q$ (fig. 1.14), care creează în jurul ei un cîmp electric. O sarcină electrică punctiformă $+q$ se deplasează în acest cîmp sub acțiunea forțelor electrice de respingere. Să presupunem că sub acțiunea acestor forțe, sarcina electrică $+q$ s-a deplasat din A în B. În acest timp, forța electrică ce acționează asupra sarcinii $+q$ produce un lucru mecanic L. Dar în timpul acestei deplasări, forța electrică nu rămîne constantă, deoarece scade cu pătratul depărtării de sarcina electrică $+Q$.

În A intensitatea forței este $F_A = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2_A}$, iar în B, $F_B = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2_B}$. Considerăm deplasarea din A în B ca o sumă de deplasări mici AC, CD... IJ... NB egale între ele. Lucrul mecanic efectuat din A în B se calculează prin însumarea lucrului mecanic efectuat pe fiecare porțiune în parte.

Notăm cu ΔL lucrul mecanic efectuat pentru transportul sarcinii pe un segment, de exemplu, din I în J. Modulele forțelor electrice la capete sînt respectiv: $F_I = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2_I}$ și $F_J = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2_J}$ și pentru că distanța este foarte mică putem considera că $F_I = F_J$ și să scriem că $r_I^2 = r_I \cdot r_J$:

$$F_I = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r^2_I} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r_I r_J} = F_J.$$

Se obține:

$$\Delta L = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon r_I r_J}(r_J - r_I) = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J}\right).$$

Lucrul mecanic total pe drumul AB este:

$$L = \sum_A^B \Delta L = \sum_A^B \frac{Qq}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J}\right) = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon}\sum_A^B\left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J}\right),$$

adică:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon}\left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_C}\right) + \left(\frac{1}{r_C} - \frac{1}{r_D}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{r_I} - \frac{1}{r_J}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{r_N} - \frac{1}{r_B}\right)\right].$$

Se observă că termenii se reduc doi cîte doi afară de primul și ultimul.

Scanned with OKEN Scanner

Deci:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right), \tag{1}$$

în care r_A și r_B sînt distanțele punctelor A și B față de centrul sarcinii Q.

1.12. **Potențialul electric. Diferența de potențial.** Cîmpul electrostatic are energie potențială, deoarece forțele electrice produc un lucru mecanic cînd deplasează o sarcină electrică liberă aflată în cîmp.

- Se numește potențial electric într-un punct al cîmpului raportul dintre lucrul mecanic cheltuit pentru a deplasa o sarcină electrică din acest punct la infinit și acea sarcină electrică:

$$\boxed{V = \frac{L}{q};} \tag{2}$$

dacă $q = 1$, $V = L$ ceea ce înseamnă că: potențialul electric V este o mărime numerică egală cu lucrul mecanic cheltuit pentru a deplasa unitatea de sarcină electrică dintr-un punct al cîmpului la infinit.

În acest caz, lucrul mecanic L va fi:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{1}{r_A},$$

deoarece $\frac{1}{r_B} \to 0$, cînd $r_B \to \infty$. Așadar

$$\boxed{V_A = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r_A}} \tag{3}$$

Potențialul electric într-un punct al cîmpului este deci direct proporțional cu sarcina electrică care îl creează și descrește cu depărtarea.

În punctul B al cîmpului, potențialul electric va fi:

$$\boxed{V_B = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r_B}.}$$

Expresia lucrului mecanic în cîmpul electrostatic:

$$L = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

poate fi scrisă și sub forma:

$$L = q\left(\frac{Q}{4\pi\varepsilon r_A} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon r_B}\right).$$

Scanned with OKEN Scanner

adică

$$\boxed{L = q(V_A - V_B),} \qquad (4)$$

în care $V_A - V_B$ reprezintă *diferența de potențial* dintre punctele A și B ale cîmpului electrostatic. Deci:

- Lucrul mecanic efectuat pentru a deplasa o sarcină electrică q între două puncte ale cîmpului electric este direct proporțional cu diferența de potențial ce există între aceste două puncte și nu depinde de drumul urmat de sarcina electrică.

Diferența de potențial $V_A - V_B$ între două puncte ale cîmpului electrostatic se numește *tensiune electrică* și se notează cu U.

Toate punctele dintr-un cîmp electric care au același potențial formează o suprafață echipotențială*. Pe o suprafață echipotențială, sarcinile electrice se deplasează fără să se efectueze lucru mecanic.

Potențialul electric este o mărime scalară ca și lucrul mecanic. El poate fi însă pozitiv sau negativ. O sarcină electrică pozitivă creează un potențial electric pozitiv, iar o sarcină electrică negativă creează un potențial electric negativ.

Din expresia generală:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r}$$

rezultă că potențialul electric creat de o sarcină electrică are valoarea maximă (în valoare absolută) în punctele în care se află sarcina electrică și scade cu cît ne depărtăm de acestea, tinzînd spre zero, cînd depărtarea tinde spre infinit. Adică, potențialul electric creat de o sarcină electrică scade cu depărtarea (fig. 1.15). Practic, potențialul electric din jurul unui corp electrizat devine zero cu mult înainte de a ne depărta prea mult de corp (deci cu mult înainte ca depărtarea să devină infinit de mare).

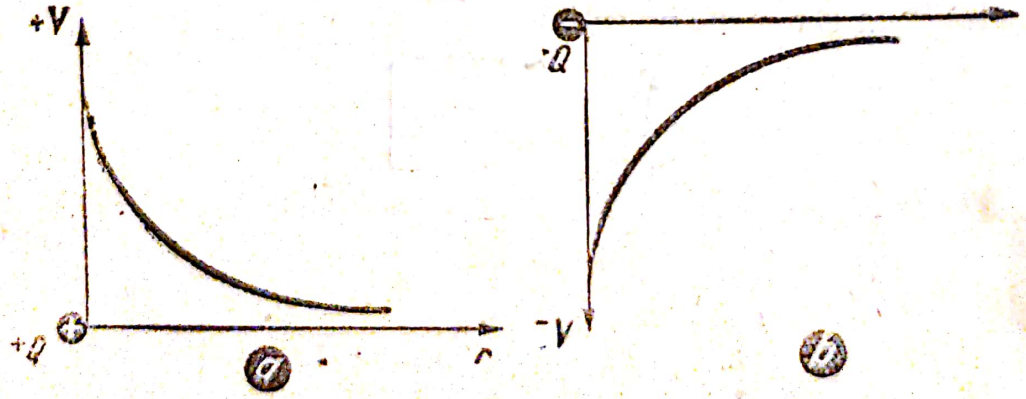


Fig. 1.15

* Suprafața unui conductor pe care sarcinile electrice sînt în echilibru este echipotențială, deoarece, în caz contrar, existînd o diferență de potențial, ar exista o deplasare de sarcini.

Observăm că o sarcină electrică pozitivă care se găsește într-un cîmp electrostatic creat de o sarcină tot pozitivă se va deplasa de la un potențial mare spre un potențial mic, în timp ce o sarcină electrică negativă se deplasează de la un potențial mic (negativ) spre un potențial mai mare.

Faptul că toate corpurile electrizate se descarcă atunci cînd sînt puse în legătură cu pămîntul permite să se considere în mod convențional că potențialul pămîntului este nul. Așadar diferența de potențial dintre un corp electrizat și pămînt este numeric egală cu potențialul corpului electrizat.

1.13. Unitatea de potențial. Din relația de definiție:

$$V_A - V_B = \frac{L}{q}$$

putem defini unitatea de tensiune electrică, adică unitatea de diferență de potențial. În adevăr, notînd cu $\langle U \rangle$ unitatea de tensiune electrică, cu $\langle L \rangle$ unitatea de lucru mecanic și cu $\langle q \rangle$ unitatea de cantitate de electricitate, putem scrie că:

$$\langle U \rangle = \frac{\langle L \rangle}{\langle q \rangle}.$$

În Sistemul Internațional de unități, potențialul și tensiunea electrică se măsoară în volți (V). Evident că:

$$1\text{V} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}},$$

ceea ce înseamnă că: *Între două puncte ale cîmpului electrostatic există o tensiune de un volt, dacă se efectuează un lucru mecanic de un joule, cînd se transportă o sarcină de un coulomb între aceste puncte.* De asemenea: *Potențialul într-un punct al cîmpului este de un volt dacă se efectuează un lucru mecanic de un joule pentru a transporta o sarcină de un coulomb din acel punct la infinit.*

1.14. Legătura dintre cîmp și potențial. Am arătat că în jurul unei sarcini punctiforme Q ia naștere un cîmp electrostatic care variază invers proporțional cu pătratul depărtării de sarcină: $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2}$. Potențialul electric în jurul aceleiași sarcini Q variază invers proporțional cu depărtarea: $V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r}$. Comparînd cele două relații se ajunge la concluzia că la distanța r de sarcină, $E = \frac{V}{r}$. Luînd $V = 1\text{V}$ și $r = 1\text{m}$, obținem unitatea de intensitate a cîmpului în SI. De aceea intensitatea cîmpului se măsoară în volt pe metru (V/m).

Plecînd de la formula de definiție a cîmpului electrostatic (formula 1, § 1.8) $E = \frac{F}{q}$, rezultă că:

$$1\,\frac{\text{V}}{\text{m}} = \frac{1\text{N}}{1\text{C}},$$

adică *un volt pe metru reprezintă intensitatea unui cîmp electrostatic în care asupra unei sarcini de un coulomb acționează o forță de un newton.*

Exercițiu: O sarcină electrică de 10^{-6} C se găsește în aer.

a) Să se calculeze intensitatea cîmpului electrostatic și potențialul cîmpului la 30 cm depărtare de sarcină (punctul A).

b) Ce lucru mecanic se produce cînd se deplasează în acest cîmp o sarcină electrică de 10^{-7} C de la 30 cm la 1 m depărtare de prima sarcină (punctul B)?

Soluție:

Datele:

$Q = 10^{-6}$ C;
$q = 10^{-7}$ C;
$r_A = 30$ cm $= 0{,}3$ m;
$r_B = 1$ m;
$\varepsilon_r = 1$.

a) Intensitatea cîmpului electrostatic o calculăm din formula:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r_A^2},$$

în care $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$, iar în SI:

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9.$$

Deci:

$$E = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\varepsilon_r r_A^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-6}}{1 \cdot 0{,}3^2} = 10^5 \text{ V/m}.$$

Potențialul electric la 30 cm depărtare de sarcina Q va fi:

$$V_A = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r_A} = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\varepsilon_r r_A} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-6}}{1 \cdot 0{,}3} = 3 \cdot 10^4 \text{ V}.$$

b) Pentru a calcula lucrul mecanic cheltuit la deplasarea sarcinii $q = 10^{-7}$ C de la $r_A = 0{,}3$ m la $r_B = 1$ m vom utiliza formula:

$$L = q(V_A - V_B).$$

În acest caz este necesar să calculăm și pe V_B din formula:

$$V_B = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r_B} = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\varepsilon_r r_B},$$

de unde:

$$V_B = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-6}}{1 \cdot 1} = 9 \cdot 10^3 \text{ V}.$$

Introducînd valorile în formula lucrului mecanic găsim:

$$L = 10^{-7}\,(3 \cdot 10^4 - 9 \cdot 10^3) = 21 \cdot 10^{-4} \text{ J}.$$

Întrebări, exerciții, probleme

1. Cum se calculează lucrul mecanic al forțelor electrice?
2. Cum se definește potențialul într-un punct al cîmpului electrostatic? Dar diferența de potențial?

Scanned with OKEN Scanner

3. Ce fel de mărime fizică este potențialul electric și cum variază cu depărtarea de sarcina electrică?

4. Ce legătură există între cîmp și potențial?

5. Care este intensitatea cîmpului electric creat de o sarcină electrică punctiformă de $+10^{-5}$ C la 1 m depărtare:
   a) cînd sarcina electrică se găsește în aer;
   b) cînd sarcina electrică se găsește în ulei de transformator?

Răspuns: $9 \cdot 10^4$ V/m; $3{,}6 \cdot 10^4$ V/m.

6. Două sarcini electrice punctuale de $+0{,}2 \cdot 10^{-9}$ C și $+0{,}4 \cdot 10^{-9}$ C se găsesc în aer la 12 cm una de alta. Care este intensitatea cîmpului electric la jumătatea distanței dintre ele?

Răspuns: $5 \cdot 10^4$ V/m.

7. Cu ce forță este deplasat un electron într-un cîmp electric cu intensitatea de 3 000 000 V/m?

Răspuns: $4{,}8 \cdot 10^{-14}$ N.

8. Ce lucru mecanic se cheltuiește într-un cîmp electric creat de o sarcină electrică $Q = +10^{-6}$ C în aer pentru a deplasa sarcina electrică punctuală $q = +10^{-7}$ C de la 1 m la 2 m depărtare de sarcina Q?
   Ce diferență de potențial există între aceste două puncte ale cîmpului electrostatic?

Răspuns: $L = 4{,}5 \cdot 10^{-4}$ J; $U = 4{,}5 \cdot 10^3$ V.

9. O sarcină punctuală $+Q$ creează în jurul ei un cîmp electrostatic care efectuează un lucru mecanic de $3 \cdot 10^{-4}$ J pentru a deplasa o sarcină electrică $q = +10^{-8}$ C de la 1 m la 1,2 m depărtare de sarcina Q.
   Să se calculeze valoarea sarcinii electrice Q și diferența de potențial între care s-a deplasat sarcina q.

Răspuns: $Q = +2 \cdot 10^{-5}$ C; $U = 3 \cdot 10^4$ V.

Interacțiunea între cîmp și substanță

1.15. Conductori în cîmp electric. Electrizarea prin influență. Am văzut pînă acum că un corp se poate electriza prin frecare și prin contact. Electrizarea unui corp se poate produce însă și de la distanță, adică *prin influență*.

Considerăm un conductor într-un cîmp electric de intensitate $\vec{E}_0$. Sub influența cîmpului electric (inductor), electronii liberi se deplasează în sens contrar liniilor de cîmp. În regiunea A apare un surplus de electroni, iar în regiunea B rămîn astfel sarcini electrice pozitive necompensate. Separarea sarcinilor electrice din conductorul introdus în cîmpul electric creează: un cîmp indus de intensitate $\vec{E}'$ de sens contrar cîmpului inductor (fig. 1.16).

Echilibrul electric se realizează aproape instantaneu; intensitatea cîmpului indus este egală și de sens contrar cu intensitatea cîmpului inductor:

$$\vec{E}' = -\vec{E}_0.$$

Fenomenul poate fi dovedit experimental luînd un cilindru metalic fixat pe un picior izolator, prevăzut cu pendule duble, formate din bobițe de soc suspendate

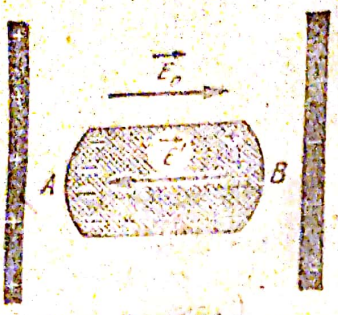


Fig. 1.16

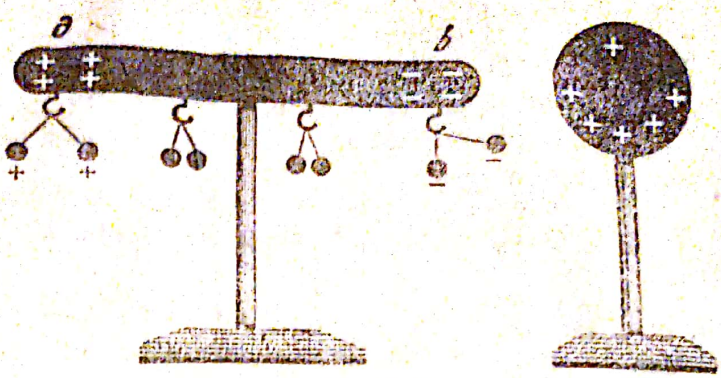


Fig. 1.17

de fire conductoare și apropiind de el o sferă electrizată pozitiv (fixată și ea pe un suport izolator). Observăm că pendulele de la extremitățile conductorului cilindric se depărtează între ele, în timp ce pendulele centrale rămîn apropiate (fig. 1.17). Lucrul acesta dovedește că cilindrul conductor, sub influența sferei electrizate, s-a electrizat numai la capete, în timp ce regiunea centrală a rămas neutră.

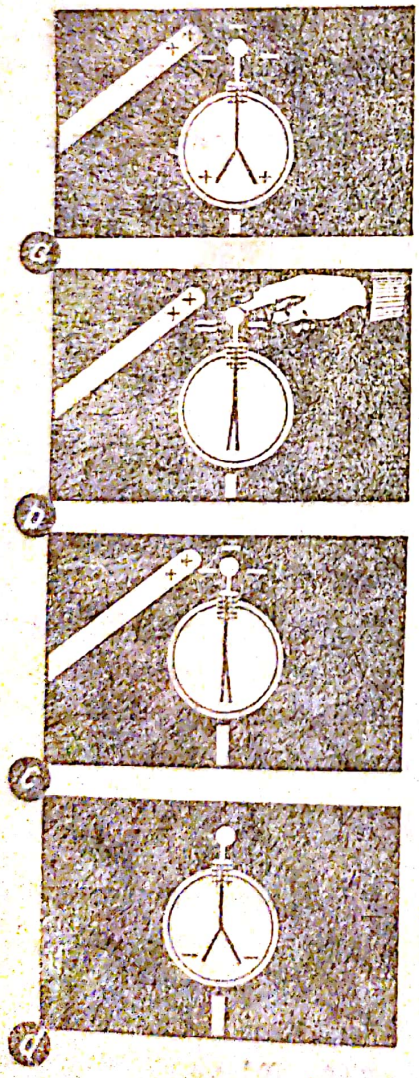


Fig. 1.18

Putem dovedi ușor că pendulele din *a* sînt încărcate pozitiv, în timp ce pendulele din *b* sînt încărcate negativ. Pentru aceasta, trecem prin apropierea lor un baston de ebonită electrizat. Pendulele din *a* vor fi atrase, în timp ce pendulele din *b* vor fi respinse.

Dacă îndepărtăm sfera electrizată de cilindru sau o descărcăm punînd-o în legătură cu pămîntul, pendulele din *a* și din *b* se apropie, adică electronii atrași în *b* se răspîndesc din nou în cilindru și compensează sarcinile pozitive ale nucleelor atomice, iar cilindrul trece din nou în stare neutră.

Această experiență dovedește că: prin influență apar întotdeauna ambele feluri de electricitate, în cantități egale, dar îndată ce îndepărtăm corpul electrizat care determină electrizarea, cele două feluri de sarcini se neutralizează.

Pentru a păstra totuși sarcini electrice pe corpul electrizat prin influență, procedăm ca în figura 1.18.

1.16. **Dielectrici în cîmpul electric.** Introducînd în cîmpul electric un dielectric, constatăm că și acesta se încarcă la capete cu sarcini electrice de semn contrar.

Faptul acesta se explică prin structura dielectricului.

Unii dielectrici au moleculele asimetrice, configurația electronilor face ca centrul sarcinilor electrice pozitive să nu coincidă cu centrul sarcinilor electrice negative. Din această categorie fac parte apa (H_2O),

Scanned with OKEN Scanner

amoniacul (NH_3), anilina ($C_6H_5NH_2$) etc. Moleculele acestor substanțe sînt molecule polare, adică nesimetrice din punct de vedere electric, fiecare moleculă fiind un dipol. Dipolul este așadar un sistem de două sarcini electrice egale și de semne contrare. Dreapta care unește centrele celor două sarcini se numește axa dipolilor.

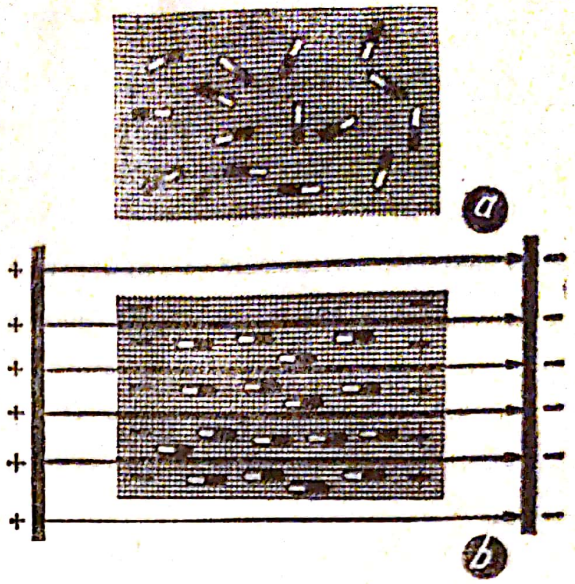


Fig. 1.19

Din cauza agitației termice, axele dipolilor sînt orientate în toate direcțiile, în mod dezordonat (fig. 1.19, *a*). Dacă un asemenea dielectric este introdus într-un cîmp electric, dipolii moleculari se orientează în lungul liniilor de forță ale cîmpului exterior (fig. 1.19, *b*). În felul acesta, la cele două capete ale dielectricului rămîn sarcini electrice necompensate și dielectricul se încarcă pozitiv la un capăt și negativ la celălalt (se polarizează), dînd naștere unui cîmp electric de sens contrar cîmpului exterior. Scoțind dielectricul din cîmpul electric, agitația termică a moleculelor face ca axele dipolilor să capete din nou o orientare dezordonată și dielectricul își pierde astfel polaritatea.

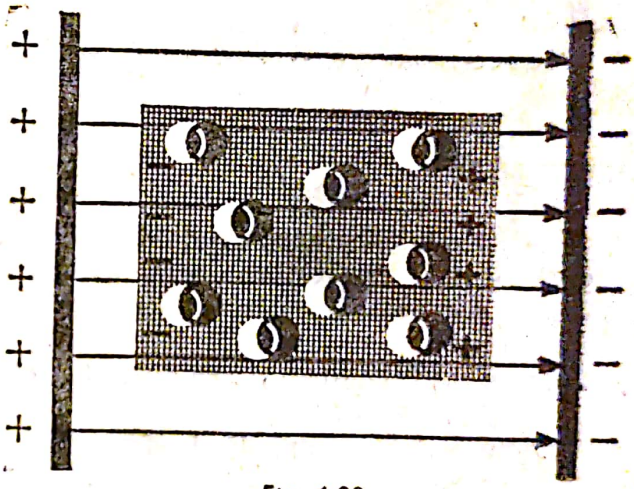


Fig. 1.20

Un dielectric este cu atît mai polarizat cu cît mai multe molecule din unitatea de volum sînt orientate de către cîmpul electric exterior. La o anumită temperatură, polarizarea unui dielectric polar este cu atît mai intensă cu cît intensitatea cîmpului electric exterior este mai mare. Ea tinde către o anumită valoare limită maximă.

Polarizarea scade însă cu creșterea temperaturii, deoarece agitația termică se opune polarizării. În apropierea lui zero absolut, cînd agitația termică este foarte slabă, chiar și un cîmp electric foarte mic poate produce polarizarea totală a unui dielectric polar.

Există însă și dielectrici cu molecule nepolare, la care centrul sarcinilor electrice pozitive coincide cu centrul sarcinilor electrice negative. Polarizarea lor în cîmpul electric se datorește deplasării acestor centre în lungul liniilor de forță ale cîmpului electric exterior (fig. 1.20). Și în acest caz, gradul de polarizare depinde de intensitatea cîmpului electric exterior, dar nu depinde de temperatura absolută, deoarece agitația termică nu influențează polarizarea.

Scanned with OKEN Scanner

Polarizarea dielectricilor explică de ce forțele de interacțiune dintre corpurile electrizate scad cînd acestea se găsesc într-un mediu dielectric. Prin polarizare, dielectricul dă naștere unui cîmp electric de sens contrar, care se scade din cîmpul electric creat de sarcinile electrice care interacționează.

1.17. **Electreți.** În 1922, fizicienii Sato și Egucii au reușit să păstreze un dielectric în stare de polarizare și după îndepărtarea cîmpului electric exterior. Ei au introdus un amestec topit de rășină și ceară într-un cîmp electric puternic $E > 10^6 \frac{V}{m}$. Dielectricul topit s-a polarizat. Lăsîndu-l să se solidifice în cîmp, dielectricul solidificat a rămas polarizat și după îndepărtarea cîmpului electric exterior, deoarece, după solidificare, un număr din moleculele dipolare ale dielectricului au rămas orientate.

Un asemenea dielectric polarizat se numește *electret*.

Un electret în formă de bară are la capete doi poli încărcați cu electricitate de semn contrar. Tăind electretul după linia sa neutră se obțin doi electreți, ambii polarizați la capete.

Electreții au căpătat importante utilizări practice.

Întrebări

1. Descrieți și explicați experiența de electrizare prin influență din figura 1.17, considerînd conductorul sferic încărcat cu electricitate negativă.
2. Arătați cum poate fi precizat semnul sarcinii electrice de pe un conductor cu ajutorul electroscopului.
3. Ce fenomene iau naștere și cum se explică ele cînd apropiem de un pendul electric un baston de sticlă electrizat?
4. Atingem o sferă electrizată de sfera unui electroscop. Ce semn au sarcinile electrice de pe corpul electrizat, dacă un baston de sticlă electrizat, apropiat de electroscop, mărește deviația foiței?
5. Cum se produce electrizarea prin influență? Cum se explică electronic această electrizare?
6. Cum se explică polarizarea unui dielectric dipolar?
7. Cum se explică polarizarea unui dielectric nepolar?
8. Ce influență are temperatura asupra gradului de polarizare a dielectricilor?
9. Ce este un electret?

F. Mașini electrostatice

1.18. **Mașina Van de Graaff.** Mașinile electrostatice sînt generatoare de diferențe de potențial. Ele transformă energia mecanică în energie electrică.

O mașină electrostatică modernă mult utilizată în laboratoare este mașina realizată în 1931 de E. J. van de Graaff. Este formată dintr-o sferă conductoare de rază mare, goală în interior (fig. 1.21), sprijinită pe un suport izolator înalt. Prin inte-

riorul suportului trece o bandă izolatoare (2), ca o curea de transmisie, care se mișcă pe două tambure cilindrice (3) și (4). Tamburul inferior este rotit cu ajutorul unui motor electric. La partea inferioară, banda se mișcă în fața unui pieptene metalic (5), așezat la cîțiva milimetri de bandă, pus în legătură cu o sursă de curent continuu (6), cu polul negativ la pămînt. Sarcinile pozitive furnizate de generator prin vîrfurile ascuțite ale pieptenelui metalic sînt transportate de bandă în interiorul sferei, de unde sînt colectate prin intermediul vîrfului metalic (7). Ele trec pe suprafața exterioară a sferei. La coborîre, banda transportă sarcinile electrice de semn contrar, de pe sferă, care se scurg în pămînt.

În felul acesta, sfera conductoare se poate încărca la un potențial de milioane de volți. Pentru acest motiv se folosește în tehnica tensiunilor înalte.

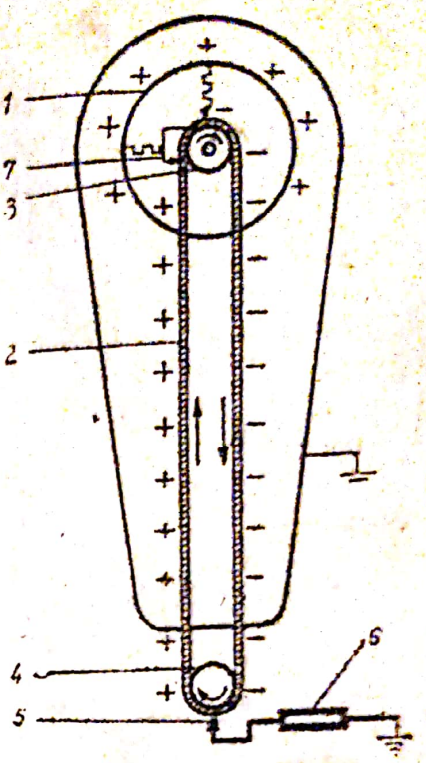


Fig. 1.21

3. Condensatori

1.19. Capacitatea electrică. Încărcînd un conductor izolat și depărtat de orice alt conductor metalic cu o anumită cantitate de electricitate Q, potențialul lui se ridică la o anumită valoare V.

S-a stabilit experimental că pentru un anumit conductor, raportul $\frac{Q}{V}$ este constant.

Raportul constant dintre cantitatea de electricitate cu care este încărcat un conductor și valoarea la care se ridică potențialul său se numește capacitate electrică.

Notînd cu C capacitatea electrică a conductorului, rezultă:

$$\boxed{C = \frac{Q}{V}.} \qquad (1)$$

Unitatea SI de capacitate electrică se numește farad (F):

$$\langle C \rangle_{SI} = \frac{\langle Q \rangle_{SI}}{\langle V \rangle_{SI}} = \frac{1\text{C}}{1\text{V}} = 1\text{F},$$

ceea ce înseamnă că *un farad este capacitatea unui conductor izolat și depărtat de alte conductoare, care la potențialul de 1 V se încarcă cu un coulomb.*

Faradul este o unitate de capacitate electrică foarte mare. De aceea, în practică se folosesc submultiplii faradului: microfaradul (μF), nanofaradul (nF) și picofaradul (pF)*.

Exemplu numeric. *a)* Să calculăm la ce potențial trebuie încărcată o sferă cu raza de 1 m pentru a primi în aer o cantitate de electricitate de 10^{-4}C?

b) Care va fi potențialul sferei încărcate după ce va fi introdusă în petrol ($\varepsilon_r = 2$)?

a) Utilizăm formula:

$$C = \frac{Q}{V}, \text{ în care } V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r}.$$

Deci:

$$C = \frac{Q}{\frac{Q}{4\pi\varepsilon r}} = 4\pi\varepsilon r$$

sau:

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \varepsilon_r \cdot r.$$

Rezultă că:

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \varepsilon_r \cdot r,$$

unde:

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\varepsilon_r \cdot r} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-4}}{1 \cdot 1} = 9 \cdot 10^5 \text{ volți.}$$

Deci, o sferă cu raza de 1 m va trebui să fie încărcată la un potențial de 900 000 volți pentru a concentra pe suprafața ei o cantitate de electricitate de o zecime de miime de coulomb.

b) Utilizînd aceeași formulă:

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \varepsilon_r \cdot r,$$

vom găsi că:

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{Q}{\varepsilon_r \cdot r};$$

de data aceasta $\varepsilon_r = 2$, deci:

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-4}}{2 \cdot 1} = 4{,}5 \cdot 10^5 \text{ volți.}$$

Așadar, prin cufundarea sferei în petrol, potențialul ei scade la jumătate.

1.20. Acumularea electricității pe conductoare. Se realizează dispozitivul din figura 1.22, format din două discuri metalice, montate pe picioare izolatoare.

---

* Pentru obținerea relațiilor de transformare se utilizează tabela de prefixe de la pagina 13.

Scanned with OKEN Scanner

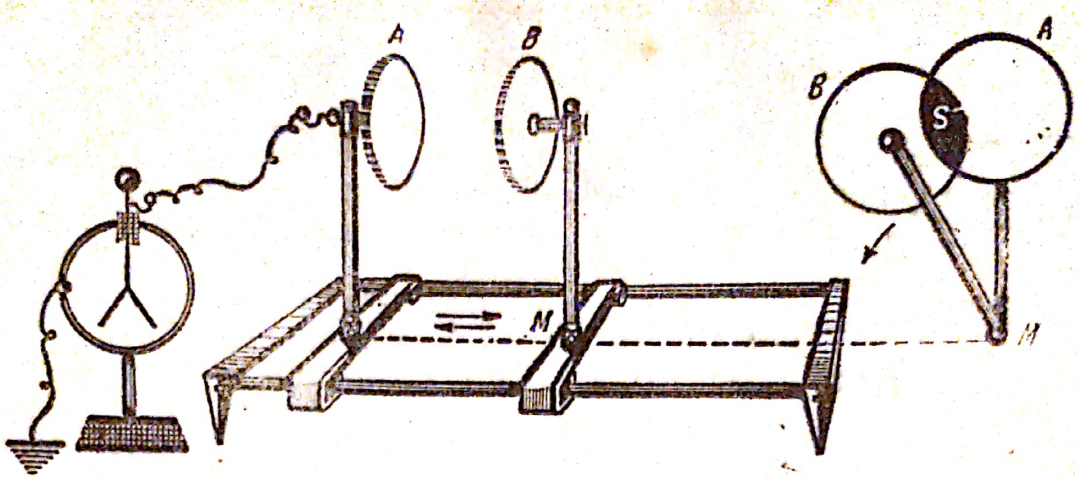


Fig. 1.22

Discul B poate culisa în lungul şinelor. Se leagă discul A cu un fir conductor de un electroscop îndepărtat. Se îndepărtează conductorul B şi se încarcă A cu electricitate.

Foiţele electroscopului deviază proporţional cu potenţialul la care se găseşte conductorul A. Apropiem de discul A conductorul plan B. Observăm că pe măsură ce conductorul B se apropie de A, foiţele electroscopului îşi micşorează deviaţia, ceea ce înseamnă că potenţialul lui scade. Întrucît cantitatea de electricitate cu care este încărcat conductorul A a rămas aceeaşi, înseamnă că, prin apropierea conductorului B, capacitatea conductorului A a crescut. În adevăr, la început potenţialul conductorului A a fost: $V = \frac{Q}{C}$. După ce s-a apropiat de el conductorul B, potenţialul conductorului A a devenit: $V' = \frac{Q}{C'}$, şi pentru că $V' < V$, rezultă $C' > C$. Capacitatea conductorului A a crescut.

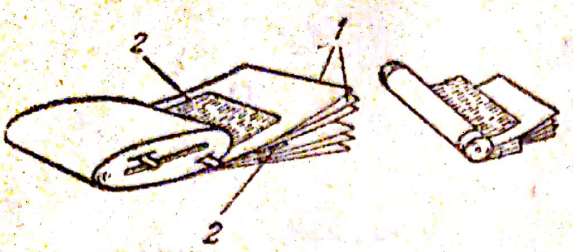
Deviaţia foiţelor electroscopului scade şi mai mult pentru o aceeaşi poziţie a conductoarelor din experienţa precedentă, dacă între conductoare se introduce o placă de dielectric.

1.21. **Condensatori electrici.** Un ansamblu de două conductoare separate între ele printr-un strat izolator formează un *condensator electric*. Condensatorul are o capacitate mult mai mare decît capacitatea conductoarelor care îl formează.

Cele două conductoare care formează condensatorul se numesc armături şi pot fi două suprafeţe plane *(condensator plan)*, două suprafeţe sferice concentrice *(condensator sferic)* sau două suprafeţe cilindrice coaxiale *(condensator cilindric)* separate între ele printr-un dielectric.

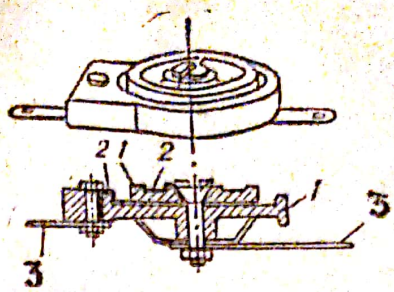
Un condensator se încarcă cînd una din armături este pusă la un potenţial oarecare. În felul acesta, fiecare armătură se încarcă cu aceeaşi cantitate de electricitate, dar de semn contrar. Între armături există o diferenţă de potenţial care dă naştere în dielectric unui cîmp electric, în general, foarte intens.

Scanned with OKEN Scanner



1. hîrtie
2. foiță de staniol

Fig. 1.23



1. material ceramic
2. strat metalic
3. conductori de legătură

Fig. 1.24

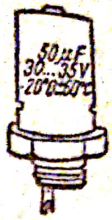


Fig. 1.25

Capacitatea electrică a unui condensator este definită prin raportul între sarcina unei armături Q și diferența de potențial dintre cele două armături A și B:

$$C = \frac{Q}{V_A - V_B}. \tag{2}$$

Unind armăturile printr-un conductor, condensatorul se descarcă, producînd o scînteie electrică. Condensatorul este deci un acumulator de energie electrică. Lucrul mecanic efectuat pentru încărcarea lui mărește energia potențială, care apoi este eliberată brusc, la descărcare, sub formă de scînteie electrică.

1.22. Diferite tipuri de condensatori. Condensatorii au o mare utilizare, mai ales în tehnica radiofonică. Se construiesc condensatori de diferite forme și capacități. Astfel, condensatorii se pot clasifica în funcție de: forma armăturilor, posibilitatea de variere a capacității, natura dielectricului sau după alte criterii.

După forma armăturilor se construiesc condensatori plani, cilindrici, sferici. Unii condensatori au capacitate fixă, iar la alții capacitatea poate varia între anumite limite. După natura dielectricului se deosebesc condensatori cu aer, hîrtie impregnată, material ceramic, mică.

Dintre condensatorii mai utilizați amintim:

Condensatorii cu hîrtie impregnată sînt construiți așa cum se arată în figura 1.23. Condensatorii cu hîrtie au, de obicei, o capacitate cuprinsă între 100 pF și 10 μF.

Condensatorii ceramici (fig. 1.24.) sînt condensatori de mică capacitate, de cele mai multe ori cuprinsă între 2 pF și 5 000 pF.

Condensatorii ficși de cea mai mare capacitate sînt *condensatorii electrolitici* sau *electrochimici* (fig. 1.25). Sînt formați dintr-un cilindru de aluminiu care se umple cu o soluție de hidroxid de sodiu. Hidroxidul de sodiu atacă aluminiul, formînd la suprafața lui un strat foarte subțire de hidroxid de aluminiu, care constituie dielectricul condensatorului și a cărui grosime are abia o fracțiune de micron. Peretele de aluminiu și hidroxidul de sodiu formează cele două armături ale condensatorului. Hidroxidul de sodiu este pus în legătură cu exteriorul printr-un conductor de fier, care nu este atacat de NaOH. Capacitatea condensatorilor electrolitici este cuprinsă între 10 μF și 2 000 μF.

Scanned with OKEN Scanner

de Se construiesc și *condensatori cu aer* (fig. 1.26) (în general, *condensatori variabili*). Armăturile sînt formate din mai multe perechi de plăci de aluminiu. O armătură este fixă, cealaltă mobilă. Prin rotirea armăturii mobile se modifică suprafața armăturilor care se găsesc față în față și deci se modifică în mod continuu și capacitatea condensatorului.

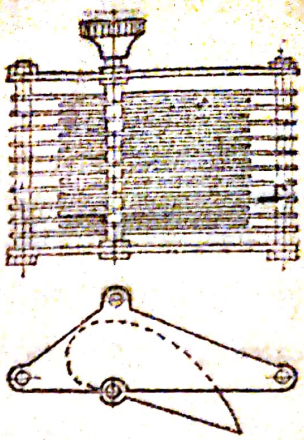


Fig. 1.26

Condensatorii nu pot fi încărcați la potențiale mai mari decît acelea pentru care au fost construiți. Dacă diferența de potențial dintre armături este prea mare, cîmpul devine foarte intens și dielectricul poate deveni bun conducător de electricitate (electronii se desprind din moleculele dielectricului). În momentul acesta, condensatorul se descarcă prin dielectric. Spunem că dielectricul a fost străpuns și condensatorul nu mai este utilizabil.

În mod convențional, un condensator se reprezintă în desen prin două linii paralele groase, egale în lungime.

Cel mai simplu condensator este condensatorul plan care este format din două armături separate între ele printr-un dielectric.

Cele două discuri ale dispozitivului din figura 1.22 formează un condensator plan. Studiul experimental al condensatorului plan se poate efectua cu acest dispozitiv.

S-a văzut că foițele electroscopului se apropie cu atît mai mult cu cît distanța dintre armături se micșorează. Deci, capacitatea variază invers proporțional cu distanța dintre armături.

Se păstrează distanța dintre discuri neschimbată și se introduce între ele o placă de ebonită, foițele electroscopului se apropie mai mult, iar înlocuirea ebonitei cu sticlă determină o și mai mare apropiere a foițelor. Faptul acesta dovedește creșterea capacității cu creșterea permitivității dielectricului dintre armături (pentru ebonită $\varepsilon_r = 2{,}7$, iar pentru sticlă, $\varepsilon_r \approx 5$).

În sfîrșit, păstrînd distanța dintre discuri constantă, se rotește lateral discul B (în jurul punctului M), foițele electroscopului își măresc deviația cu atît mai mult cu cît suprafața comună (S) a celor două discuri este mai mică și se micșorează cînd suprafața comună a armăturilor crește. Capacitatea crește cu suprafața armăturilor care se privesc față în față. Toate aceste concluzii se concretizează în formula:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d},$$

ceea ce înseamnă că, capacitatea unui condensator plan este direct proporțională cu permitivitatea dielectricului, direct proporțională cu suprafața comună a armăturilor și invers proporțională cu distanța dintre armături.

Observație. În SI capacitatea se măsoară în farazi, suprafața armăturilor, în metri pătrați, iar distanța dintre armături, în metri, de unde rezultă că în acest sistem de unități permitivitatea se măsoară în farazi pe metru $\left(\frac{F}{m}\right)$.

În adevăr:

$$\varepsilon = \frac{Cd}{S}, \quad \langle \varepsilon \rangle_{SI} = \frac{\text{F} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = \frac{\text{F}}{\text{m}}.$$

Exemplu. Să calculăm capacitatea unui condensator plan format din două plăci metalice avînd fiecare suprafața de 100 cm² lipite pe o placă de sticlă cu grosimea de 1 mm. Permitivitatea relativă a sticlei este $\varepsilon_r = 5$.

Soluția: În formula capacității condensatorului plan: $C = \frac{\varepsilon S}{d}$ vom ține seama că $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, în care $\varepsilon_0 = 8{,}856 \cdot 10^{-12}$ F/m, iar $S = 100$ cm² $= 10^{-2}$ m² și 1 mm $= 10^{-3}$ m. Putem scrie deci:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} = \frac{8{,}856 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{10^{-3}} = 44{,}28 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 442{,}8 \text{ pF}.$$

1.23. Gruparea condensatorilor. În practică se pune de multe ori problema să obținem o capacitate diferită de aceea a condensatorilor de care dispunem. Lucrul acesta se realizează prin gruparea condensatorilor. Grupînd mai mulți condensatori împreună, ei se comportă ca un condensator unic, cu o capacitate diferită de aceea a fiecărui condensator în parte.

Mai mulți condensatori grupați împreună formează o baterie de condensatori. Condensatorii se pot grupa *în paralel (în suprafață)*, *în serie (în cascadă)* și *mixt*.

a) *Gruparea condensatorilor în paralel* se realizează legînd toate armăturile pozitive împreună și, de altă parte, toate armăturile negative împreună (fig. 1.27). În felul acesta, armăturile pozitive sînt puse la același potențial V_A, iar armăturile negative, la potențialul V_B (care poate fi zero, dacă armăturile sînt legate la pămînt).

Însemnăm cu C_1, C_2 și C_3 capacitățile celor trei condensatori din figura 1.27 grupați în suprafață. Fiind puși la aceeași diferență de potențial $V_A - V_B$, vor acumula cantități de electricitate diferite Q_1, Q_2, Q_3 (deoarece au capacități diferite) în așa fel încît:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_A - V_B}, \quad C_2 = \frac{Q_2}{V_A - V_B} \text{ și } C_3 = \frac{Q_3}{V_A - V_B}.$$

Gruparea va funcționa sub aceeași diferență de potențial. Deci, capacitatea bateriei este: $C = \frac{Q}{V_A - V_B}$, în care Q este cantitatea totală de electricitate acumulată de baterie, adică:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

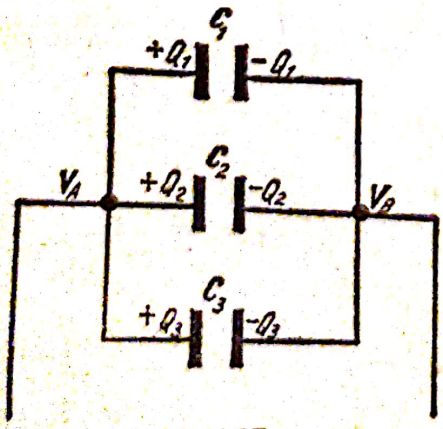


Fig. 1.27

Înlocuind în această egalitate cantitățile de electricitate cu valorile lor scoase din formula capacității, obținem:

$$C(V_A - V_B) = C_1(V_A - V_B) + C_2(V_A - V_B) + C_3(V_A - V_B),$$

Scanned with OKEN Scanner

de unde:

$$\boxed{C = C_1 + C_2 + C_3} \qquad (3)$$

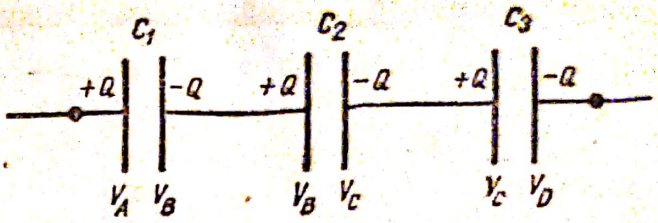


Fig. 1.28

Deci, *grupînd condensatorii în suprafață, capacitatea bateriei este egală cu suma capacităților condensatorilor grupați.*

b) *Gruparea condensatorilor în cascadă* se realizează legînd armăturile ca în figura 1.28. În acest caz, pe fiecare armătură se acumulează aceeași cantitate de electricitate, alternativ pozitivă și negativă, iar potențialul armăturilor legate împreună este același.

Capacitățile condensatorilor fiind diferite putem scrie:

$$C_1 = \frac{Q}{V_A - V_B}; \qquad C_2 = \frac{Q}{V_B - V_C} \qquad C_3 = \frac{Q}{V_C - V_D}.$$

Gruparea va conține aceeași cantitate de electricitate Q la potențialul $V_A - V_D$ egal cu suma diferențelor de potențial la care se găsește fiecare condensator în parte, adică:

$$C = \frac{Q}{V_A - V_D}.$$

Ținînd seama că:

$$V_A - V_D = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D)$$

și înlocuind diferențele de potențial prin valorile lor scoase din formulele capacităților obținem:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3},$$

de unde:

$$\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.} \qquad (4)$$

Deci, în cazul grupării condensatorilor în cascadă, *inversul capacității bateriei este egal cu suma inverselor capacităților condensatorilor grupați.* Se obține astfel o capacitate mai mică decît capacitatea fiecărui condensator în parte.

Exercițiu. Trei condensatori de 1 μF, 3 μF și 4 μF se grupează întîi în suprafață, apoi în cascadă. La ce diferență de potențial trebuie să funcționeze ca să acumuleze în fiecare caz 10^{-3}C?

Soluție: *a)* grupați în suprafață, bateria va avea capacitatea

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

adică:

$$C = 1\mu F + 3\mu F + 4\mu F = 8\mu F = 8 \cdot 10^{-6}\,F,$$

iar:

$$V_A - V_D = \frac{Q}{C} = \frac{10^{-3}\,\text{C}}{8 \cdot 10^{-6}\,\text{F}} = 125\ \text{V}.$$

b) grupați în cascadă, capacitatea grupării va fi:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3},$$

adică:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{1\mu\text{F}} + \frac{1}{3\mu\text{F}} + \frac{1}{4\mu\text{F}} = \frac{19}{12\mu\text{F}},$$

iar

$$C = \frac{12}{19}\,\mu\text{F} = \frac{12}{19}\,10^{-6}\,\text{F}.$$

Diferența de potențial la care trebuie încărcată bateria va fi:

$$V_A - V_D = \frac{Q}{C} = \frac{10^{-3}\,\text{C}}{\frac{12}{19}\,10^{-6}\,\text{F}} \approx 1\,583\ \text{V}.$$

Întrebări, exerciții, probleme

1. Ce se numește capacitate electrică?
2. Care este unitatea de capacitate electrică în SI? Ce submultipli se folosesc în practică?
3. Ce este un condensator electric și cum se explică acumularea electricității pe un condensator? Cum se dovedește experimental?
4. De ce mărimi depinde capacitatea unui condensator plan?
5. Cîte feluri de condensatori cunoașteți? Descrieți-i.
6. Cum se grupează condensatorii în suprafață? Care este capacitatea grupării?
7. Cum se grupează condensatorii în paralel? Care este capacitatea grupării?
8. La ce potențial trebuie încărcat un condensator sferic cu raza de 9 cm ca să acumuleze în aer o cantitate de electricitate de 10^{-6} C?

Răspuns: $V = 10^5$ volți.

9. Cu ce forță se resping două sfere egale în mărime cînd se ating și sînt încărcate la un potențial de 300 000 V?

Răspuns: 2,5 N.

10. Ce capacitate are un condensator plan ale cărui armături au o suprafață de 100 cm², iar distanța dintre ele este de 2 mm:
a) cînd dielectricul dintre ele este sticla ($\varepsilon_r = 8$);
b) cînd se scoate sticla dintre armături?

Răspuns: 354,24 pF; 44,28 pF.

11. Trebuind să se construiască un condensator cu hîrtie de 44,28 nF se utilizează o bandă formată din 2 foițe de staniol de 5 cm lățime, separate printr-o bandă de hîrtie parafinată. Ce lungime de bandă se va folosi dacă hîrtia parafinată are o grosime de 0,1 mm și permitivitatea relativă 2?

Răspuns: $L = 5$ m.

Scanned with OKEN Scanner

12. Trei condensatori de 1μF, 2μF și 3μF se grupează în paralel și în cascadă. Care este în fiecare caz capacitatea grupării?

Răspuns: 6 μF; $\frac{6}{11}$ μF.

1.24. **Fenomene electrostatice în tehnică.** Datorită fenomenului de electrizare prin frecare, între anumite părți metalice ale mașinilor-unelte apar uneori cîmpuri electrice intense și se pot produce descărcări prin scînteie.

Cercetările au arătat că, de exemplu, la o curea de transmisie care se deplasează cu o viteză de 15 $\frac{m}{s}$ se poate produce, între curea și tamburul pe care se deplasează, o tensiune de aproximativ 75 kV.

Potențiale ridicate se produc pe sulurile metalice pe care se înfășoară pînza sau stofa în fabricile textile. Același fenomen de electrizare prin frecare se observă și la fabricile de hîrtie sau în locurile unde se lucrează cu pulberi fine (fabrici de zahăr, de produse făinoase).

Înlăturarea acumulării sarcinilor electrice în asemenea procese tehnologice constituie o importantă problemă de securitate și protecție a muncii.

Pe de altă parte, fenomenele electrostatice au o largă aplicație în cercetarea științifică.

Mașini electrostatice perfecționate, capabile să producă diferențe de potențial de milioane de volți, sînt folosite ca acceleratori de particule electrizate în laboratoarele de fizică atomică.

Cu ajutorul mașinilor electrostatice se fac studii asupra comportării dielectricilor în cîmpuri electrice intense, izolatorilor pentru linii de transport, dielectricilor pentru condensatori, uleiurilor pentru transformatori etc,

Nu trebuie să uităm nici fenomenele electrostatice care apar în atmosferă în timpul furtunilor, de care trebuie ferite clădirile înalte, coșurile de fabrică, antenele posturilor de emisie radio sau televiziune, navele pe mări sau avioanele în zbor.

Cunoașterea fenomenelor electrostatice se impune astfel în domenii largi de activitate.

2. Electrocinetică

1. Curentul electric de conducție și efectele lui

2.1. Curentul electric de conducție. Conductoarele metalice conțin electroni liberi, care se mișcă dezordonat printre ionii rețelei cristaline ce formează metalul. Conductoarele lichide conțin numeroși ioni, purtători microscopici de sarcini, pozitivi sau negativi, aflați, de asemenea, în mișcare dezordonată prin lichid. Dacă aceste conductoare se găsesc într-un cîmp electric, atunci asupra fiecărui purtător de sarcină electron sau ion, cîmpul electric exercită forțe care îi imprimă o mișcare. Ca urmare, peste mișcarea lor dezordonată se suprapune o mișcare ordonată, adică purtători de același fel de sarcină se mișcă în ansamblu pe aceeași direcție, în același sens. *Curentul electric de conducție constă în mișcarea ordonată față de conductor a purtătorilor microscopici de sarcină electrică, liberi în interiorul lui.*

În conductoarele metalice, purtătorii de sarcină fiind electronii liberi, curentul electric se numește *curent electronic*. În lichide purtătorii de sarcină fiind ionii pozitivi sau negativi, curentul electric se numește *curent ionic*.

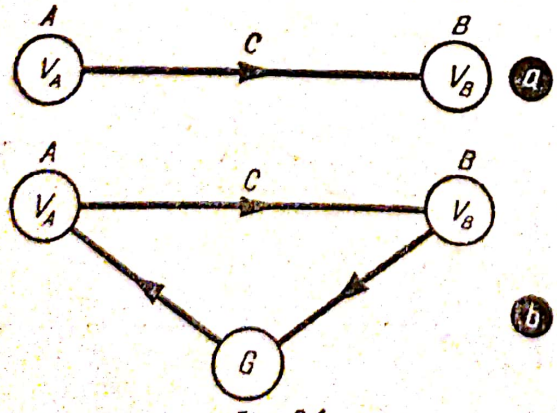


Fig. 2.1

2.2. Generator electric. Printr-un fir conductor se unesc două conductoare A și B (fig. 2.1, *a*), încărcate la potențiale diferite $V_B > V_A$. Electronii trec de pe conductorul A pe conductorul B, în sensul arătat de săgeată, pînă ce potențialele lor se egalează. Curentul electric a durat un timp foarte scurt. Pentru a menține un timp mai îndelungat

Scanned with OKEN Scanner

curentul electric prin firul C, trebuie menținută constantă diferența de potențial $V_B - V_A$ dintre conductoarele A și B. Pentru aceasta trebuie ca electronii să revină continuu de la B la A printr-un alt fir conductor BGA (fig. 2.1, *b*). Electronii pot trece de la A la B sub acțiunea forțelor electrice produse de cîmpul electrostatic dintre conductoarele încărcate A și B. Ei nu pot reveni însă prin firul BGA sub acțiunea aceluiași fel de forțe electrostatice. Acest fir trebuie să treacă printr-un dispozitiv G, capabil să transmită electronilor o anumită energie, pentru ca aceștia să poată învinge forțele produse de cîmpul electrostatic. Acest dispozitiv G se numește *generator* sau *sursă electrică*. Sursa produce și menține tensiunea electrică necesară trecerii curentului. Tensiunea produsă se numește *tensiune electromotoare*.

Energia sursei — de origine mecanică, chimică, internă etc. — se transformă în energie electrică cedată circuitului.

În mod convențional, generatorul electric de tensiune continuă se reprezintă prin simbolurile din figura 2.2.

2.3. **Circuit electric.** Curentul electric continuu (constant ori variabil) se poate produce numai într-un circuit închis. Acesta se compune din două părți: generatorul G și *receptoarele* R (fig. 2.3) sau *consumatoarele* de energie electrică. Receptoare sînt sîrmele de legătură și aparatele care utilizează energie electrică. Porțiunea de circuit B_1GB_2 care se găsește în interiorul generatorului se numește *circuit interior*. Porțiunea de circuit formată din receptoare se numește *circuit exterior*. Tensiunea electromotoare produsă de generator se notează cu E.

Lucrul mecanic efectuat de forțele exercitate de cîmpul electromotor pentru a transporta sarcina electrică q este dat de relația:

$$L = Eq,$$

care se obține din $L = Uq$, înlocuind U cu tensiunea electromotoare E, stabilită la studiul cîmpului electrostatic. Acest lucru mecanic este egal cu energia transmisă de generator în circuit pentru a transporta sarcina q.

Din $L = Eq$ se scoate: $E = \frac{L}{q}$.

Așadar, *tensiunea electromotoare este o mărime numeric egală cu energia transmisă de generator pentru a trece prin circuit unitatea de sarcină electrică.*

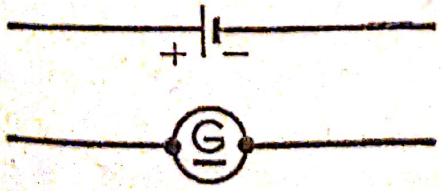


Fig. 2.2

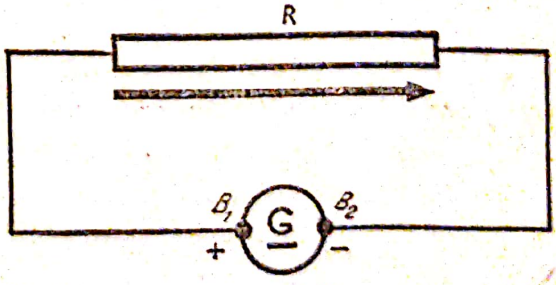


Fig. 2.3

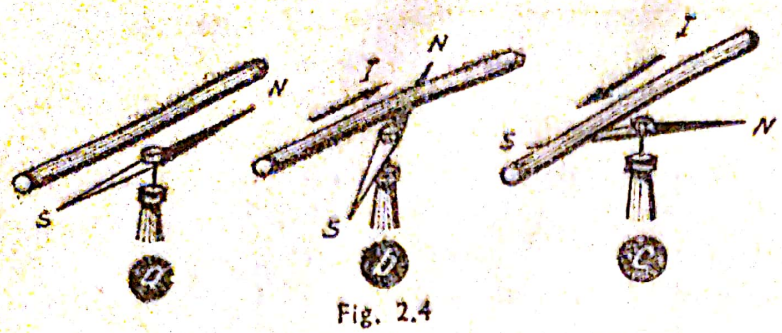


Fig. 2.4

2.4. Efectele curentului electric de conducție. Existența și mărimea curentului electric dintr-un conductor se pot constata după efectele pe care le produc. Principalele efecte ale curentului electric sînt: *efectul electrocaloric*, *efectul chimic*, *efectul magnetic*.

a. *Efectul electrocaloric*. Curentul electric încălzește conductorul prin care circulă. Pe acest efect funcționează fierul de călcat, becul electric, ciocanul electric de lipit etc.

b. *Efectul chimic*. Constă în dirijarea ionilor din soluțiile conductoare — electroliți — către electrozi; sub acțiunea cîmpului electric, la electrozi ionii se neutralizează și se depun sau produc diferite reacții chimice. Fenomenul se numește *electroliză*.

c. *Efectul magnetic*. Curentul electric generează în jurul conductorului prin care trece un cîmp magnetic; acesta deviază din poziția $N - S$ un ac magnetic (fig. 2.4), aflat în vecinătatea curentului electric. Fenomenul a fost descoperit (1820) de Örsted.

2.5. Sensul curentului electric. Experiențele au arătat că depunerea substanțelor la electrozi sau sensul de deviație al acului magnetic depind și de bornele generatorului la care se face conectarea firelor conductoare. Astfel, metalele se depun totdeauna la electrodul negativ, adică la capătul sîrmei legat la borna negativă a generatorului. De asemenea, polul N al acului magnetic își schimbă sensul deviației (fig. 2.4, *b*, *c*) dacă se inversează legăturile la bornele generatorului. Așadar: curentul electric posedă o polaritate bine determinată. *S-a ales ca sens al curentului electric sensul de mișcare a particulelor pozitive prin circuitul exterior. Prin circuitul exterior R* (fig. 2.3) *curentul circulă de la borna* B_1, *considerată pozitivă, către borna* B_2, *considerată negativă.*

Este de remarcat că alegerea acestui sens este convențională. Sensul curentului coincide cu sensul mișcării cationilor în cazul curentului ionic, dar este opus sensului de mișcare a electronilor în curentul electronic. Toate legile și regulile din electrocinetică și electromagnetism au la bază acest sens al curentului electric.

2.6. Intensitatea curentului electric. Sînt mai intenși — au intensitate mai mare — curenții care produc în același interval de timp o încălzire mai mare sau depun o cantitate de substanță mai mare la electrozi, sau curenții electrici care deviază mai mult un ac magnetic decît curenții electrici care produc aceste efecte în măsură mai mică. Intensitatea curentului este o mărime care caracterizează curentul electric.

Intensitatea curentului electric este o mărime fundamentală a Sistemului Internațional. Unitatea de intensitate este o unitate fundamentală și se numește amper (simbol A). Etalonul ei de măsură se va stabili pe temeiul unor fenomene pe care le vom studia ceva mai departe. Pe baza amperului s-a definit unitatea de sarcină electrică. Un

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 2.5

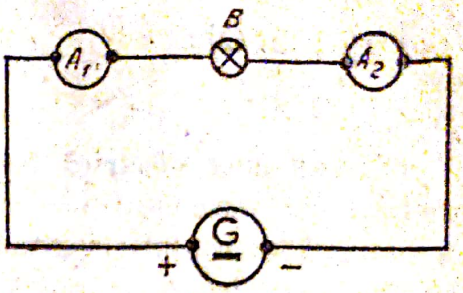


Fig. 2.6

coulomb este sarcina electrică transportată într-o secundă printr-o secțiune transversală a circuitului, de un curent de 1 A:

$$1C = 1A \cdot 1s = 1A \cdot s.$$

Intensitatea curentului electric de conducție se măsoară cu ajutorul unui aparat numit *ampermetru*. El se construiește pe baza unuia dintre efectele curentului electric. Simbolul ampermetrului este arătat în figura 2.5.

Intensitatea rămîne constantă de-a lungul unui circuit neramificat. Considerăm un circuit în care un generator G alimentează cu curent continuu o lampă B (fig. 2.6). Ampermetrele A_1 și A_2 indică aceeași intensitate a curentului electric. Cu alte cuvinte, ampermetrul poate fi conectat în orice punct al circuitului neramificat: *intensitatea curentului electric este aceeași în tot lungul circuitului neramificat.*

Dacă se ține seamă că un curent electric este o mișcare dirijată de purtătorii de sarcină electrică (în cazul conductoarelor metalice, electronii) este ușor de înțeles de ce intensitatea este aceeași în tot circuitul. Electronii pornesc de la borna negativă a generatorului, trec prin receptor și ajung la borna pozitivă a generatorului fără ca — în regim staționar — să se acumuleze în vreun punct al circuitului. Prin mișcarea lor se transmite circuitului energia primită de la cîmpul electromotor, respectiv de la sursă; numărul lor rămîne același*. De aceea prin fiecare secțiune a circuitului trece în fiecare secundă același număr de purtători de sarcină, deci intensitatea este aceeași.

Există cazuri în care curentul, fără a-și schimba sensul, are intensitatea variabilă. În cele ce urmează, cînd nu se specifică, este vorba de curent continuu constant.

Întrebări, exerciții

1. Să se compare curentul electronic cu curentul ionic.
2. Să se explice rolul generatorului într-un circuit parcurs de curent electric.
3. Din ce cauză intensitatea curentului continuu rămîne constantă de-a lungul unui circuit neramificat?
4. Un fier de călcat funcționează cu o intensitate de 4,8 A. Cîți electroni trec pe secundă printr-o secțiune a circuitului?

   Răspuns: $3 \cdot 10^{19}$.

5. O sferă metalică încărcată negativ este legată la pămînt printr-un fir metalic. Ea se descarcă în 0,1 s, trecînd prin fir un curent electric mediu de 10 μA. Ce sarcină electrică a avut sfera inițial și ce număr de electroni conținea?

   Răspuns: 10^{-6} C; $6{,}2 \cdot 10^{13}$.

* Receptoarele electrice (reșou, bec, fier de călcat, mașină de spălat rufe etc.) nu „consumă curent electric", cum se spune de obicei. Ele consumă energie electrică.

Scanned with OKEN Scanner

8. Legea lui Ohm

2.7. Tensiunea electrică între două puncte ale circuitului. Generatorul electric produce tensiunea electromotoare, care determină mișcarea purtătorilor de sarcini de-a lungul întregului circuit. Între două puncte ale unui circuit există totdeauna o tensiune electrică (o anumită diferență de potențial).

Tensiunea electrică dintre două puncte ale unui circuit electric se măsoară cu ajutorul unui aparat, numit *voltmetru*. Bornele lui se conectează la punctele A și C, între care trebuie măsurată tensiunea electrică (fig. 2.7). Spunem că voltmetrul se conectează în paralel cu porțiunea de circuit între capetele căreia se măsoară tensiunea. Voltmetrul V măsoară tensiunea dintre punctele A și C, între care se găsește consumatorul B (de exemplu, o lampă electrică), iar ampermetrul A se conectează în serie. Tensiunea electrică se măsoară în volți, în SI.

2.8. Legea lui Ohm. În mișcarea lor ordonată prin conductor (curentul electric), electronii întîmpină o forță de rezistență F_r, pe care o presupunem proporțională cu viteza dirijată a electronilor v_e, adică $F_r = kv_e$, k fiind un factor de proporționalitate.

Dacă F_e este forța care antrenează electronul, se poate scrie $F_e = F_r$. Dar $F_e = eE$, E fiind intensitatea cîmpului electric. Așadar:

$$eE = kv_e;\ v_e = \frac{eE}{k}. \qquad (1)$$

Considerăm o porțiune din conductor cu secțiunea S și lungimea egală cu v_e (fig. 2.8). Toți electronii cuprinși în volumul $V = Sv_e$, aflați în mișcare dirijată, vor ieși într-o secundă prin fața S_2. Notînd cu n_0 numărul de electroni liberi din unitatea de volum, se obține:

$$I = n_0 eSv_e.$$

Ținînd seama de relația (1), se obține:

$$I = n_0 eS\frac{eE}{k} = \frac{n_0 e^2}{k} SE.$$

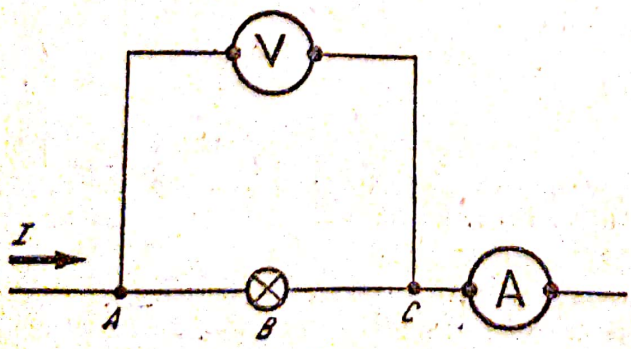


Fig. 2.7

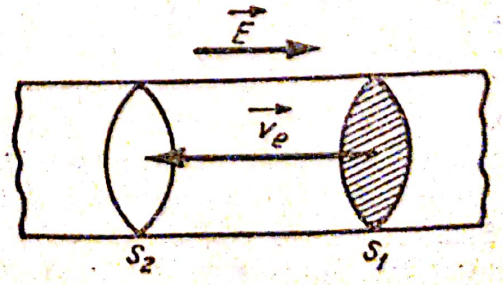


Fig. 2.8.

Deoarece $E = \frac{U}{l}$, U fiind tensiunea aplicată la capetele conductorului de lungime l, se poate scrie:

$$I = \frac{n_0 e^2}{k} S \frac{U}{l}; \qquad I = \frac{U}{\frac{k}{n_0 e^2} \cdot \frac{l}{S}}.$$

Ţinînd seamă că sarcina electronului e este constantă universală, iar n_0 şi k sînt constante de material se poate nota $\rho = \frac{k}{n_0 e^2}$, o constantă de material pe care o numim rezistivitate. Atunci: $I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{U}{R}$, adică tocmai legea lui Ohm în care $R = \rho \frac{l}{S}$. În această relaţie ρ fiind o constantă de material, iar S şi l sînt dimensiuni ale conductorului, mărimea R caracterizează contribuţia porţiunii de circuit la realizarea procesului numit curent electric. Ea se numeşte *rezistenţă electrică* a conductorului parcurs de curentul electric.

Expresia:

$$I = \frac{U}{R} \tag{2}$$

se numeşte legea lui Ohm pentru o porţiune de circuit, şi se enunţă astfel: *intensitatea curentului printr-o porţiune de circuit este egală cu cîtul dintre tensiunea aplicată la capetele acestei porţiuni de circuit şi rezistenţa porţiunii de circuit.* Pentru ca această formă a legii lui Ohm să se poată aplica trebuie ca pe porţiunea de circuit să nu se găsească generatoare electrice.

2.9. **Rezistenţa electrică.** Rezistenţa electrică a unui conductor poate fi pusă în evidenţă experimental. În circuitul exterior al unei surse electrice (fig. 2.9) se conectează pe rînd o lampă B, un reşou, un fir metalic, un fier de călcat etc. De fiecare dată se măsoară tensiunea U şi intensitatea I, cu voltmetrul V, respectiv cu ampermetrul A. Se constată că, deşi tensiunea U rămîne practic aceeaşi, intensitatea curentului I variază de la caz la caz. Acest fapt arată că un curent electric întîmpină rezistenţă la trecerea prin circuit. Diferitele conductoare se opun în mod diferit trecerii curentului electric prin ele. Proprietatea conductoarelor electrice de a se opune trecerii curentului electric se numeşte *rezistenţă electrică*. Rezistenţa electrică a unui conductor se poate determina cantitativ pe baza legii lui Ohm. Pentru aceasta se repetă experienţa din figura 2.9 în felul următor:

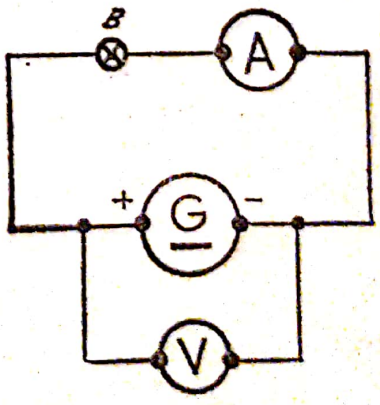


Fig. 2.9

George Simon Ohm (1787–1854) fizician german. A studiat conductibilitatea metalelor și a descoperit (1826) legea fundamentală a curentului electric. A făcut cercetări în acustică (1843).

Aceluiași receptor B i se aplică tensiuni U de 2, de 3, de n ori mai mari, celelalte condiții rămînînd neschimbate. Se constată că intensitatea curentului I corespunzătoare devine de 2, de 3, de n ori mai mare. Urmează că pentru același receptor se poate scrie:

$$\frac{U}{I} = \frac{2U}{2I} = \frac{nU}{nI} = \text{const.} = K.$$

Repetînd experiența cu alt receptor, raportul $\frac{U}{I} = \text{const.} = K_1$ rămîne tot constant, dar constanta K_1 are în general altă valoare decît în primul caz. *Valoarea acestei constante este o mărime caracteristică fiecărui conductor.* Această mărime măsoară cantitativ rezistența electrică a conductorului. Deci: *rezistența electrică a unui conductor este o mărime ce poate fi măsurată prin citul dintre tensiunea electrică constantă, aplicată între capetele conductorului și intensitatea curentului continuu produs de ca în conductor.*

Rezistorul este elementul de circuit care se caracterizează în principal prin rezistența lui electrică și este folosit pentru această proprietate. Rezistorul se reprezintă simbolic ca în figura 2.10. Existența rezistenței electrice se explică pe baza teoriei electronice ca urmare a ciocnirilor dintre electronii care formează curentul electric și ionii care formează rețeaua cristalină a metalului. Prin aceste ciocniri, electronii cedează ionilor energia lor cinetică. Sursa ce menține tensiunea la bornele circuitului, și, deci, cîmpul electric care pune electronii în mișcare dirijată transmite electronilor mereu altă energie, pe care prin ciocniri aceștia o transmit rețelei cristaline. Ca urmare, conductorul parcurs de curent electric se încălzește.

Cauza rezistenței electrice constă așadar în extrem de numeroasele ciocniri ale electronilor liberi cu ionii metalului. Rezistența electrică determină și proprietatea unui conductor de a transforma energia electrică în energie internă.

Din legea lui Ohm se deduce unitatea de rezistență electrică:

$$\langle R \rangle_{SI} = \frac{\langle U \rangle}{\langle I \rangle} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \text{ohm}\,(\Omega).$$

Unitatea de rezistență electrică în Sistemul Internațional este *ohmul. Un ohm este rezistența unui conductor prin care se stabilește un curent de un amper, dacă la capetele lui se aplică o tensiune constantă de un volt.*

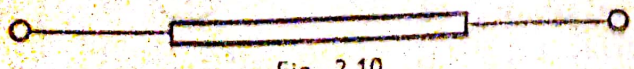


Fig. 2.10

Inversul rezistenței electrice $G = \frac{1}{R}$ se numește *conductanță electrică*. Unitatea de conductanță se numește *siemens*, cu simbolul *S*. *Un siemens este conductanța unui circuit a cărui rezistență este de un ohm*: $1\ S = 1\ \Omega^{-1}$.

2.10. **Dependența rezistenței de dimensiunile și de natura conductorului.** Analizînd expresia rezistenței unui conductor $R = \frac{k}{n_0 e^2} \frac{l}{S}$ se constată că primul factor care se notează cu litera ρ este $\rho = \frac{k}{n_0 e^2}$ o mărime specifică structurii rețelei cristaline a conductorului. Ea a primit numele de *rezistivitate* și e un factor al rezistenței, care depinde de natura substanței conductorului. Al doilea factor este citul dintre lungimea conductorului și secțiunea *S* a lui. Prin urmare rezistența unui conductor poate fi exprimată prin formula:

$$\boxed{R = \rho \frac{l}{S},} \qquad (3)$$

în care *l* este lungimea conductorului, *S* este secțiunea lui, iar ρ este o constantă de material, numită *rezistivitate*. Cu ajutorul acestei formule se poate calcula rezistența unui conductor.

Experimental, dependența rezistenței de elementele geometrice ale conductorului și de natura acestuia se poate demonstra procedînd ca la lucrarea de laborator numărul 5.

Valoarea numerică a factorului ρ depinde și de unitățile în care se măsoară. Făcînd $l = 1$ m și $S = 1$ m^2, din formula (3) se deduce că $\rho = R$, adică *rezistivitatea unei substanțe este o mărime numerică egală cu rezistența unui conductor din acea substanță, avînd lungimea de* 1 m *și secțiunea de* 1 m^2. Unitatea de rezistivitate va fi:

$$\langle \rho \rangle_{SI} = \frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m,$$

adică *ohm-metru. Este rezistivitatea unei substanțe din care e făcut un conductor care avînd lungimea de* 1 m *și secțiunea de* 1 m^2, *este de rezistență de* 1 Ω.*

Inversul rezistivității $\sigma = \frac{1}{\rho}$ se numește *conductivitate* și se măsoară în $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$.

După valorile conductivității, substanțele se pot clasifica în:
conductoare, dacă σ este cuprinsă între $10^5 - 10^8\ \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$;
semiconductoare, dacă σ este cuprinsă între $10^{-7} - 10^5\ \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$;
izolatoare, dacă σ este cuprinsă între $10^{-20} - 10^{-8}\ \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$.

---

* În electrotehnică se mai folosește pentru rezistivitate o unitate convențională care se numește ohm-milimetru pătrat pe metru:

$$\langle \rho \rangle_{tehn.} = \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} = \frac{\Omega \cdot 10^{-6} m^2}{m} = 10^{-6}\ \Omega \cdot m = 1 \mu\Omega \cdot m.$$

Scanned with OKEN Scanner

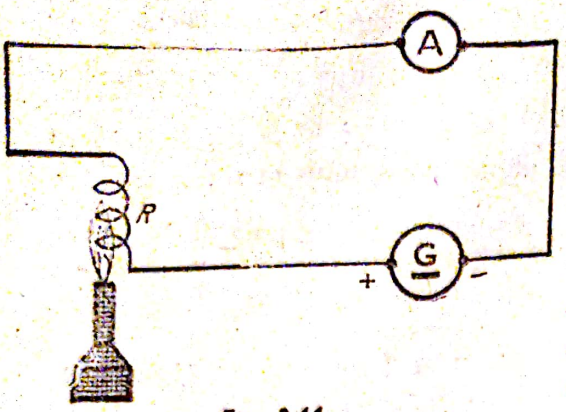


Fig. 2.11

2.11. Dependența rezistenței de temperatură. Rezistivitatea substanțelor depinde și de temperatură. O spirală din sîrmă subțire din fier R, în serie cu un ampermetru A (fig. 2.11) sînt conectate la o sursă electrică G. Încălzind spirala R cu o flacără, intensitatea indicată de ampermetrul A scade, ceea ce dovedește că rezistența firului din fier crește prin încălzire. Fenomenul a fost verificat la numeroase conductoare. Ținînd seamă de formula (3, § 2.10) și deoarece se constată că variația dimensiunilor l și S este neglijabilă, variația rezistenței provine din cauza variației rezistivității ρ. Așadar, rezistivitatea substanțelor conductoare variază cu temperatura. Pentru variații de temperatură nu prea mari, rezistivitatea variază în funcție de temperatură, după relația următoare:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \tag{4}$$

în care ρ_0 este rezistivitatea la 0°C (273°K), ρ este rezistivitatea la temperatura t, iar α este coeficientul termic al rezistivității. Pentru metale pure, valoarea lui α este în jurul lui 0,004 grd^{-1}. La aliaje, valoarea coeficientului termic α este mai mică decît a metalelor componente. Pentru unele aliaje, valoarea lui poate fi considerată practic nulă. Astfel de aliaje sînt: *manganina* (86% Cu + 12% Mn + 2% Ni), *constantanul* (54%Cu + 45%Ni + 1%Mn), *nichelina* (62% Cu + 18%Ni + 20% Zn), *crom-nichelul* (57%Ni + 16%Cr + 26%Fe + 1%Mn). Se folosesc aceste aliaje pentru construirea rezistoarelor, care să aibă rezistențe aproape independente de temperatură. Proprietatea acestor aliaje de a avea coeficientul termic foarte mic se poate arăta cu experiența din figura 2.11, înlocuind spirala din fier R printr-o spirală confecționată din sîrmă a unuia din aliajele menționate mai sus: prin încălzirea spiralei R, intensitatea curentului rămîne practic constantă, deci rezistența nu variază practic cu temperatura. Există o serie de substanțe, numite semiconductoare, a căror rezistivitate scade cînd temperatura crește. Acestea sînt substanțe care au conductivitatea cam de 10^{15} ori mai mică decît conductoarele, fără a fi totuși izolante. Asemenea substanțe sînt Ge, Si și alte elemente din grupele IV, V și VI, Cu_2O, precum și multe minerale. Conductivitatea lor crește odată cu temperatura.

În tabela următoare se dau rezistivitatea și coeficientul termic al rezistivității pentru cîteva substanțe.

Rezistivitatea și coeficientul termic al rezistivității

Substanța	la 293°K	α	Substanța	la 293°K	α
	ρ în $\Omega \cdot m$	în grd^{-1}		ρ în $\Omega \cdot m$	în grd^{-1}
Argint	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$	0,0036	Nichelină	$42 \cdot 10^{-8}$	0,0002
Cupru	$1{,}75 \cdot 10^{-8}$	0,0040	Manganină	$43 \cdot 10^{-8}$	0,00001
Aluminiu	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$	0,0036	Constantan	$50 \cdot 10^{-8}$	0,00001
Tungsten	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$	0,0052	Mercur	$95{,}8 \cdot 10^{-8}$	0,00089
Fier	$9{,}8 \cdot 10^{-8}$	0,0050	Crom-nichel	$110 \cdot 10^{-8}$	0,0004
Platin	$10{,}5 \cdot 10^{-8}$	0,0037	Bismut	$120 \cdot 10^{-8}$	0,004

Scanned with OKEN Scanner

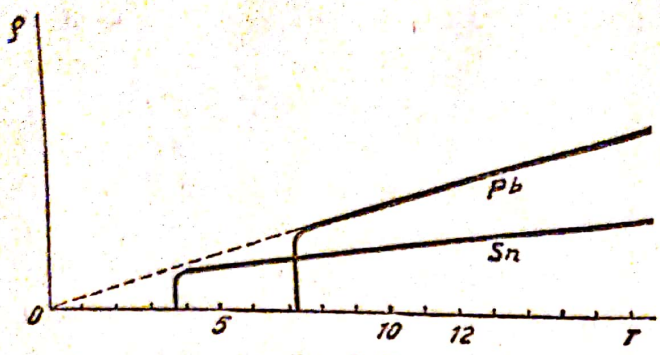


Fig. 2.12

2.12. Supraconductibilitatea. Rezistivitatea metalelor scade cînd temperatura scade. Fizicianul olandez Kamerlingh Onnes a descoperit (1911) că la mercur se anulează rezistivitatea în vecinătatea lui 0°K, şi anume, la 4,15°K. Sub această temperatură el se comportă ca un conductor fără rezistenţă electrică. La fel se comportă plumbul, care îşi anulează practic rezistivitatea la 7,22°K, staniul la 3,73°K (fig. 2.12), niobiul la 9,22°K etc. S-au găsit multe metale şi aliaje care prezintă proprietatea de a-şi scădea brusc rezistivitatea la o valoare practic nulă, cînd sînt răcite la o anumită temperatură sub 10°K. Sub temperatura la care îşi anulează rezistivitatea, aceste substanţe se găsesc în *stare de supraconductibilitate*, adică nu au rezistenţă electrică. Astfel, un curent electric indus într-o spiră de plumb ţinută în heliu lichid a durat multe zile pînă să înceteze.

2.13. Legea lui Ohm pe circuitul întreg. Dacă se parcurge mintal circuitul în sensul *BADCB* (fig. 2.13) se constată că *suma căderilor de tensiune pe întregul circuit este egală cu tensiunea electromotoare E*. În aceste condiţii se va putea scrie: $IR + Ir = E$, de unde:

$$\boxed{I = \frac{E}{R + r}} \qquad (5)$$

care constituie legea lui Ohm pe întregul circuit. Prin E se înţelege suma algebrică a t.e.m. din circuit, prin R se înţelege rezistenţa totală a circuitului exterior, prin r, rezistenţa interioară.

Însă diferenţa de potenţial la borne

$$U = V_B - V_C = IR,$$

încît se mai poate scrie:

$$U = V_B - V_C = E - Ir,$$

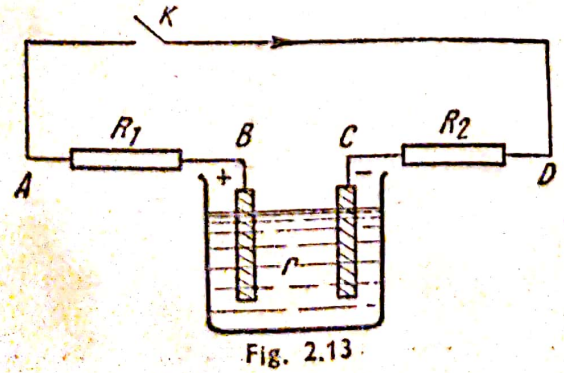


Fig. 2.13

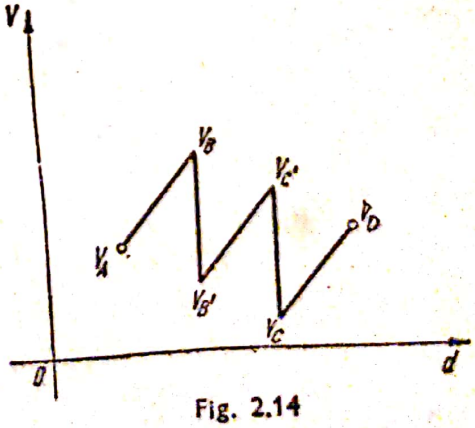


Fig. 2.14

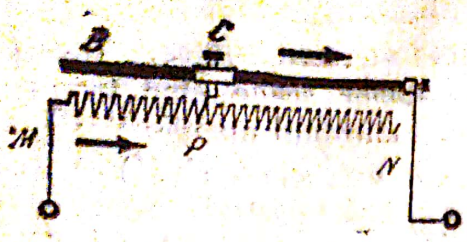


Fig. 2.15

adică diferența de potențial (tensiunea) la borne este egală cu diferența dintre t.e.m. și căderea interioară de tensiune.

Cînd circuitul este deschis, $I = 0$ și $U = V_B - V_C = E$, adică t.e.m. este egală cu tensiunea la borne în circuit deschis.

Circuitul deschis (întrerupt) echivalează cu o rezistență infinită introdusă în circuit. Să presupunem că rezistența exterioară a circuitului scade treptat: în aceeași măsură crește intensitatea curentului, deci crește $u = Ir$. Ca urmare, scade tensiunea la borne U. Dacă rezistența exterioară devine zero, atunci $U = RI = 0$, iar $I = \frac{E}{r}$ capătă valoarea maximă pe care o poate da un generator. Se spune că s-a produs *scurt circuit*. Scurtcircuitul reprezintă un pericol pentru generatoarele cu rezistență interioară mică: ele pot fi distruse prin încălzirea foarte mare produsă de intensitatea curentului electric, de asemenea, foarte mare.

2.14. **Reostate.** Reostatul este un aparat format dintr-un rezistor, care are rezistența variabilă. Cu ajutorul lui se poate regla valoarea intensității unui curent electric. De exemplu, tensiunea dată de generator este $U = 12\text{V}$, iar un bec care trebuie alimentat la această tensiune suportă 2A și are $3\,\Omega$. Pus la tensiunea de 12V, receptorul ar fi parcurs de un curent de $\frac{12\text{V}}{3\,\Omega} = 4\text{A}$ mult peste valoarea lui nominală. Pentru a-l aduce la funcționare normală se leagă în circuit un rezistor cu rezistență variabilă, care să mărească rezistența circuitului exterior. Reostatele sînt de mai multe feluri:

a. *Reostatul cu cursor* sau cu contact alunecător este cel mai practic (fig. 2. 15). Se compune dintr-o sîrmă înfășurată pe un cilindru de porțelan sau alt izolator. Deasupra se găsește o bară metalică B, pe care alunecă cursorul C, în așa fel încît face contact alunecător P cu sîrma reostatului. Cînd cursorul este deplasat spre capătul M, rezistența introdusă în circuit scade și deci intensitatea curentului reglat crește. Cînd cursorul ajunge la capătul N, întreaga rezistență a reostatului a fost introdusă în circuit. Cu ajutorul reostatului cu cursor se poate realiza o variație aproape continuă și uniformă a rezistenței, deci o reglare a intensității curentului din circuit.

b. *Reostatul cu manetă* are rezistoare în formă de spirală, legate ca în figura 2.16. Maneta M se poate roti în jurul unui ax S, trecînd peste contactele $1, 2, 3\ldots$ formate din plăcuțe metalice, numite pluturi. Punînd maneta pe plotul 0, reostatul este scos

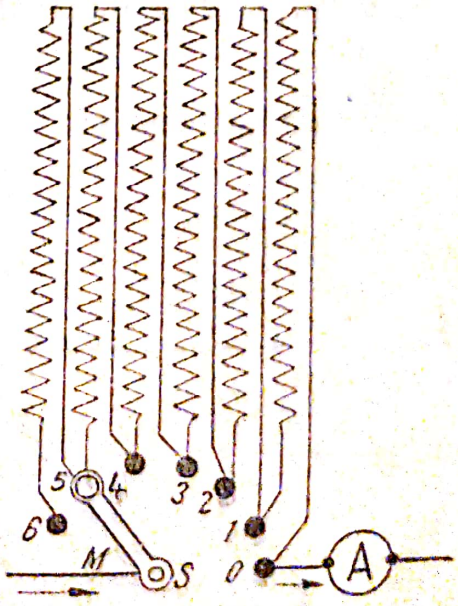


Fig. 2.16

din circuit şi curentul trece de la o bornă la alta numai prin manetă. Cînd maneta trece pe ploturi de la *0* la *6*, rezistenţa introdusă în circuit creşte. Creşterea rezistenţei, deci variaţia intensităţii curentului reglat, se face prin salturi, nu în mod continuu, fiecare salt fiind egal cu rezistenţa cuprinsă între două ploturi vecine.

Mai există reostate cu lămpi şi cutii de rezistenţă, despre care se va vorbi în lecţiile următoare.

Întrebări, exerciţii, probleme

1. Să se explice electronic rezistenţa electrică.
2. Prin ce se caracterizează starea de supraconductibilitate?
3. Cum se explică conductibilitatea electrică la metale?
4. Să se compare t.e.m. cu tensiunea la bornele sursei.
5. Să se compare sensul curentului în generatoare şi în consumatoare.
6. De ce slăbeşte lumina becurilor cînd se pune în funcţiune fierul de călcat?
7. O sîrmă de fier devine incandescentă la trecerea curentului electric prin ea. Introducînd parte din ea în apă, restul sîrmei se înroşeşte mai intens ori se topeşte? De ce?
8. Două sîrme de aceeaşi lungime şi secţiune, una din cupru, alta din fier, sînt legate în serie şi formează circuitul exterior al unui generator. Care sîrmă se va înroşi mai înainte? De ce?
9. Ce tensiune trebuie aplicată la bornele unui electromotor care consumă o energie de 4 400 jouli în fiecare secundă, funcţionînd cu intensitatea de 20 A?

Răspuns: 220 V.

10. Un receptor cu rezistenţa de 11 Ω este conectat la o tensiune de 220 V, printr-un conductor de 0,4 Ω. Care este căderea de tensiune în conductor şi ce tensiune rămîne pentru receptor?

Răspuns: 7,7 V; 212,3 V.

11. Să se calculeze lungimea firului cu rezistenţa de 1 Ω, făcut din cupru, din aluminiu, tungsten, din fier, din manganin sau din mercur, avînd secţiunea de 1 mm².

Răspuns: 57,1 m; 35,7 m; 18,1 m; 10,2 m; 2,32 m; 1,04 m.

12. Ce secţiune are rezistenţa unui fier de călcat de 24 Ω din crom-nichel, lungă de 6 m?

Răspuns: 0,275 mm².

13. Care este intensitatea curentului electric ce trece printr-o conductă de cupru lungă de 170 m, dacă ea are secţiunea de 16 mm² şi este conectată la reţeaua de 220 V, ştiind că prin ea pierderea este de 6% din tensiune?

Răspuns: 71 A

14. Un voltmetru indică 12 V la bornele unui acumulator în circuit deschis. Dacă se închide circuitul exterior, format dintr-o rezistenţă de 5 Ω, voltmetrul indică 11 V la bornele acumulatorului. Ce rezistenţă interioară are acumulatorul?

Răspuns: 0,455 Ω.

15. Rezistenţa electrică a înfăşurării unui electromotor este de 11 Ω la 15°C. După cîteva ore de funcţionare ajunge la 13,1 Ω. Care este temperatura înfăşurării, ştiind că este făcută din cupru?

Răspuns: 65,5°.

din circuit şi curentul trece de la o bornă la alta numai prin manetă. Cînd maneta trece pe ploturi de la *0* la *6*, rezistenţa introdusă în circuit creşte. Creşterea rezistenţei, deci variaţia intensităţii curentului reglat, se face prin salturi, nu în mod continuu, fiecare salt fiind egal cu rezistenţa cuprinsă între două ploturi vecine.

Mai există reostate cu lămpi şi cutii de rezistenţă, despre care se va vorbi în lecţiile următoare.

Întrebări, exerciţii, probleme

1. Să se explice electronic rezistenţa electrică.
2. Prin ce se caracterizează starea de supraconductibilitate?
3. Cum se explică conductibilitatea electrică la metale?
4. Să se compare t.e.m. cu tensiunea la bornele sursei.
5. Să se compare sensul curentului în generatoare şi în consumatoare.
6. De ce slăbeşte lumina becurilor cînd se pune în funcţiune fierul de călcat?
7. O sîrmă de fier devine incandescentă la trecerea curentului electric prin ea. Introducînd parte din ea în apă, restul sîrmei se înroşeşte mai intens ori se topeşte? De ce?
8. Două sîrme de aceeaşi lungime şi secţiune, una din cupru, alta din fier, sînt legate în serie şi formează circuitul exterior al unui generator. Care sîrmă se va înroşi mai înainte? De ce?
9. Ce tensiune trebuie aplicată la bornele unui electromotor care consumă o energie de 4 400 jouli în fiecare secundă, funcţionînd cu intensitatea de 20 A?

Răspuns: 220 V.

10. Un receptor cu rezistenţa de 11 Ω este conectat la o tensiune de 220 V, printr-un conductor de 0,4 Ω. Care este căderea de tensiune în conductor şi ce tensiune rămîne pentru receptor?

Răspuns: 7,7 V; 212,3 V.

11. Să se calculeze lungimea firului cu rezistenţa de 1 Ω, făcut din cupru, din aluminiu, din tungsten, din fier, din manganin sau din mercur, avînd secţiunea de 1 mm².

Răspuns: 57,1 m; 35,7 m; 18,1 m; 10,2 m; 2,32 m; 1,04 m.

12. Ce secţiune are rezistenţa unui fier de călcat de 24 Ω din crom-nichel, lungă de 6 m?

Răspuns: 0,275 mm².

13. Care este intensitatea curentului electric ce trece printr-o conductă de cupru lungă de 170 m, dacă ea are secţiunea de 16 mm² şi este conectată la reţeaua de 220 V, ştiind că prin ea pierderea este de 6% din tensiune?

Răspuns: 71 A.

14. Un voltmetru indică 12 V la bornele unui acumulator în circuit deschis. Dacă se închide circuitul exterior, format dintr-o rezistenţă de 5 Ω, voltmetrul indică 11 V la bornele acumulatorului. Ce rezistenţă interioară are acumulatorul?

Răspuns: 0,455 Ω.

15. Rezistenţa electrică a înfăşurării unui electromotor este de 11 Ω la 15°C. După cîteva ore de funcţionare ajunge la 13,1 Ω. Care este temperatura înfăşurării, ştiind că este făcută din cupru?

Răspuns: 65,5°.

Scanned with OKEN Scanner

16. Filamentul unui bec conectat la 2 V este parcurs de 0,28 A; conectat la 220 V este parcurs de 4,43 A. Ce valori au rezistențele lui în cele două cazuri? Cu cît a crescut temperatura în al doilea caz, dacă filamentul are coeficientul termic 0,0052 grad^{-1}?

Răspuns: 7,1 Ω; 49,6 Ω; ≈ 1 153°C.

17. Să se construiască graficul de variație a intensității curentului în circuit, în funcție de rezistența circuitului de la 0,5 Ω pînă la 20 Ω, știind că tensiunea la bornele circuitului este de 40 V. Pe acest grafic să se determine: curentul în circuit pentru rezistențele de 1,5 Ω, 1 Ω, 7 Ω sau 8,7 Ω; rezistența circuitului la curenții de 15 A sau 7,5 A.

18. Un receptor electric cu rezistența de 2 Ω este alimentat de un generator cu rezistența interioară de 0,3 Ω și t.e.m. de 130 V. Conductoarele prin care se conectează receptorul la generator au fiecare 0,15 Ω. Care este tensiunea la bornele generatorului și care este căderea de tensiune pe linie (pe conductoare)?

Răspuns: 115 V; 15 V.

19. Un element galvanic produce un curent de 0,8 A atunci cînd circuitul exterior este format dintr-un fir de cupru cu lungimea de 50 m și cu secțiunea de 1,7 mm^2. Dacă se înlocuiește circuitul exterior printr-un fir de fier lung de 60 m și cu secțiunea de 3 mm^2, curentul care circulă este de 0,5 A. Ce t.e.m. și ce rezistență interioară are elementul?

Răspuns: 1,93 V; 1,9 Ω.

20. O centrală electrică furnizează curent continuu sub 600 V, energia electrică trebuie transportată la 10 km, cu un curent de 10 A, iar căderea de tensiune pe linia de transport să nu depășească 3%. Ce secțiune vor avea conductoarele de cupru?

Răspuns: 194,4 mm^2.

21. Un ampermetru indică 2 A într-un circuit simplu. Adăugînd în serie o rezistență suplimentară de 1 Ω, ampermetrul indică 0,6 A. Înlocuind rezistența de 1 Ω cu alta necunoscută, ampermetrul indică $\frac{72}{57}$ A. Se cer: rezistența necunoscută și t.e.m. a sursei din circuit.

Răspuns: 0,25 Ω; 0,857 V.

2. Curenți ramificați

2.15. **Rețele electrice.** Pînă aici ne-am ocupat numai de circuite electrice neramificate. Folosirea în practică a energiei electrice se face de cele mai multe ori cu ajutorul unor circuite electrice complicate, numite rețele electrice. Privind în interiorul unui aparat de radio, se observă o mulțime de sîrme care se încrucișează în nenumărate puncte. Acestea formează *o rețea electrică*. Ea este alcătuită din mai multe ramificații prin care circulă curenți de diferite intensități.

Oricît de complexă ar fi o rețea electrică, ea are două elemente constitutive: *nodul rețelei* și *ochiul de rețea* (fig. 2.17). Nod de rețea este punctul de întîlnire a cel puțin trei conductoare. Ochiul de rețea este o succesiune de laturi formînd o curbă închisă. Exemple de noduri: A, B, C, D și F; exemple de ochiuri de rețea: $ABCDA$, $ADFA$ și $ABCDFA$. G.R. Kirchhoff a demonstrat, în 1847, două teoreme pentru nodurile și ochiurile rețelelor electrice. Cu ajutorul lor se pot scrie relații între intensitățile, rezistențele și tensiunile unui circuit oricît de complicat.

Scanned with OKEN Scanner

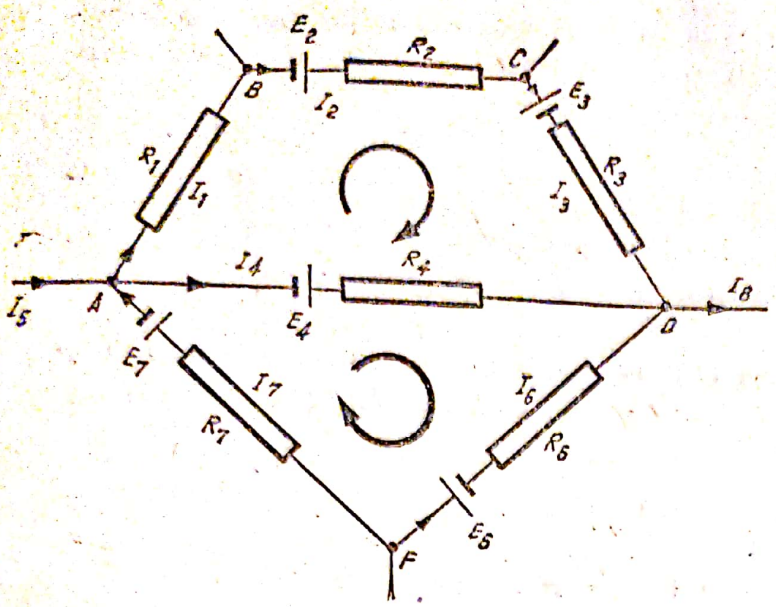


Fig. 2.17

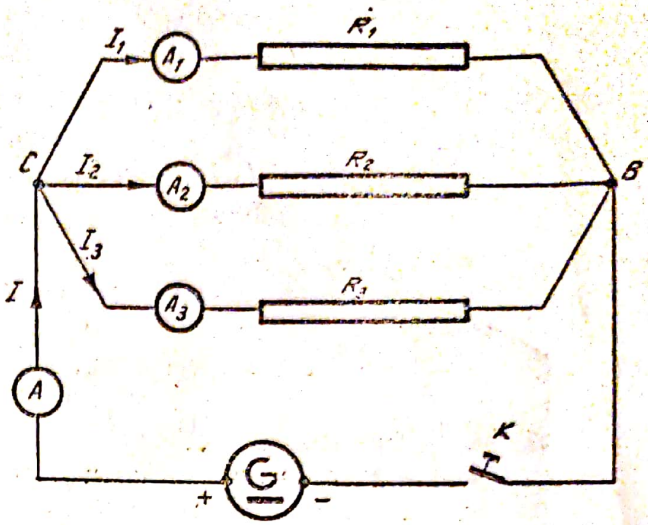


Fig. 2.18

2.16. Prima teoremă a lui Kirchhoff. Prima teoremă a lui Kirchhoff se referă la noduri și se bazează pe legea conservării sarcinilor electrice: în orice punct al unui circuit electric, suma sarcinilor care intră în acel punct trebuie să fie egală cu suma sarcinilor care ies în același interval de timp. Deci și suma intensităților curenților care intră într-un nod este egală cu suma intensităților ce ies. Pentru nodul A (fig. 2.17) se va putea scrie:

$$I_5 + I_7 = I_1 + I_4 \text{ sau}$$

$$I_5 + I_7 - I_1 - I_4 = 0;$$

pentru nodul D: $I_4 + I_6 + I_3 = I_8$ sau $I_4 + I_6 + I_3 - I_8 = 0$ etc.

Considerînd cu semnul (+) intensitățile curenților care vin spre nod și cu semnul (—) intensitățile curenților care ies din nod, se poate spune că:

Suma algebrică a intensităților curenților care se întîlnesc într-un nod este egală cu zero.

Analitic se poate scrie:

$$\boxed{\sum_{k=1}^{n} I_k = 0.} \qquad (1)$$

Experiență. Prin închiderea întrerupătorului K din figura 2.18 se constată că indicațiile ampermetrelor arată că $I = I_1 + I_2 + I_3$, ceea ce confirmă experimental prima teoremă a lui Kirchhoff.

Observație. Pentru rezolvarea problemelor se va ține seamă că, deși se poate scrie relația (1) pentru fiecare din cele n noduri ale rețelei, se obțin ecuații independente numai pentru $n - 1$ noduri; ultima ecuație decurge din cele precedente. În figura 2.17 sînt cinci noduri, deci se pot scrie patru ecuații independente.

Scanned with OKEN Scanner

Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887). Fizician german. A descoperit legile curenților derivați (1847). A studiat radiația corpului negru și a descoperit una din legile acestei radiații. Împreună cu R. Bunsen a descoperit inversiunea liniei spectrale a sodiului (rezonanță optică) și a pus bazele analizei spectrale (1859).

2.17. A doua teoremă a lui Kirchhoff. Se aplică la ochiurile de rețea. Fie ochiul de rețea $ABCDA$ (fig. 2.17) în care considerăm fiecare porțiune dintre două noduri consecutive *(latură)*. Dacă se consideră potențialele la capetele fiecărei laturi, E fiind tensiunea electromotoare pe această porțiune de circuit, aplicînd legea lui Ohm pentru ochiul de rețea $ABCDA$ se poate scrie: pe ramura AB:

$$V_A - V_B = I_1R_1;$$

pe ramura BC:

$$E_2 = V_C - V_B + I_2(r_2 + R_2)$$

sau

$$V_B - V_C + E_2 = I_2(r_2 + R_2);$$

pe ramura CD:

$$-E_3 = V_D - V_C + I_3(r_3 + R_3)$$

sau

$$V_C - V_D - E_3 = I_3(r_3 + R_3);$$

pe ramura DA:

$$E_4 = V_D - V_A + I_4(r_4 + R_4)$$

sau

$$V_D - V_A - E_4 = -I_4(r_4 + R_4).$$

Adunînd membru cu membru se obține:

$$I_1R_1 + I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) - I_4(R_4 + r_4) = E_2 - E_3 - E_4.$$

Se observă că se poate alege arbitrar la început un sens de parcurs al conturului ochiului de rețea, de exemplu, sensul orar. Semnul produsului RI este pozitiv atunci cînd sensul ales pentru curent coincide cu sensul ales pentru parcurs; semnul pentru t.e.m. E este considerat pozitiv atunci cînd sensul de parcurs prin interiorul generatorului este de la polul — la polul + . De exemplu, pe ramura BC, semnul curentului este pozitiv, iar semnul t.e.m. E_2 este tot pozitiv; pe ramura CD semnul curentului este pozitiv, iar semnul t.e.m. E_3 este negativ. Pe ramura DA atît I_4 cît și E_4 sînt negative.

Deci:

De-a lungul conturului unui ochi de rețea, suma algebrică a t.e.m. este egală cu suma algebrică a produselor dintre intensitate și rezistența totală din fiecare ramură. Este a doua teoremă a lui Kirchhoff. Generalizînd, ea se poate scrie astfel:

$$\boxed{\sum_{k=1}^{n} E_k = \sum_{k=1}^{n} I_kR_k.} \qquad (2)$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru ochiul de rețea $ADFA$, ea se scrie:

$$E_4 + E_6 - E_7 = I_4(R_4 + r_4) - I_6(R_6 + r_6) + I_7(R_7 + r_7).$$

Observație: Teorema a doua a lui Kirchhoff permite scrierea unei ecuații pentru fiecare ochi al unei rețele electrice. La rezolvarea problemelor se ține seamă însă că se obțin ecuații independente numai pentru ochiurile de rețea *fundamentale**. De exemplu, în rețeaua din figura 2.17 sînt posibile trei ochiuri de rețea: $ABCDA$, $ADFA$ și $ABCDFA$. Ochiuri de rețea fundamentale sînt însă numai ochiurile de rețea $ABCDA$ și $ADFA$. Deci se pot scrie, în acest caz, numai două ecuații independente. În general, dacă l este numărul de laturi, iar n acela al nodurilor, se pot scrie $l - n + 1$ ecuații independente prin aplicarea teoremei a doua a lui Kirchhoff.

Cu ajutorul celor două teoreme ale lui Kirchhoff se pot rezolva multe probleme ale circuitelor electrice complexe. Pentru un circuit neramificat, a doua teoremă a lui Kirchhoff devine legea lui Ohm pe întregul circuit. Aplicînd teorema a doua la circuitul din figura 2.13 se obține: $E = I(R + r)$, adică tocmai relația 5 (§ 2.13). Dacă în circuitul ramificat nu există surse electrice,

$$\text{atunci } \sum_{k=1}^{n} E_k = 0, \quad \text{deci } \sum_{k=1}^{n} I_k R_k = 0.$$

2.18. **Rezistența echivalentă a rezistoarelor grupate în serie.** Mai multe rezistoare de rezistență R_1, R_2, R_3 sînt conectate în serie (fig. 2.19). Se caută valoarea rezistenței echivalente, adică rezistența R a rezistorului care, fiind conectat între punctele A și D, poate înlocui rezistoarele de rezistențe R_1, R_2, R_3, fără a modifica intensitatea I a curentului din circuit. Cu ajutorul voltmetrului V se măsoară succesiv diferențele de potențial dintre punctele AB, BC, CD, adică tensiunile U_1, U_2, U_3 dintre capetele fiecărui rezistor, apoi tensiunea U între capetele extreme AD ale rezistoarelor înseriate. Se constată că: $U = U_1 + U_2 + U_3$. Ținînd seamă de legea lui Ohm, $U = IR$, se poate scrie:

$$RI = R_1 I + R_2 I + R_3 I = (R_1 + R_2 + R_3)I,$$

adică

$$\boxed{R = R_1 + R_2 + R_3.}$$

Generalizînd pentru n rezistoare conectate în serie se va scrie:

$$\boxed{R = \sum_{k=1}^{n} R_k.} \qquad (3)$$

Rezistența echivalentă a mai multor rezistoare conectate în serie este egală cu suma rezistențelor acelor rezistoare.

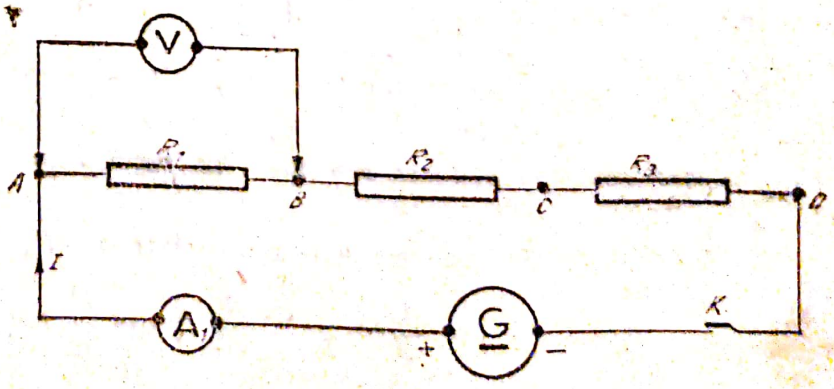


Fig. 2.19

* Care nu sînt realizate prin suprapunerea celor precedente.

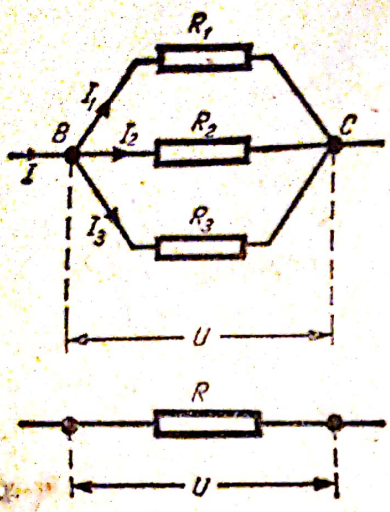


Fig. 2.20

2.19. Rezistența echivalentă a rezistoarelor conectate în paralel. Mai multe rezistoare avînd rezistențele R_1, R_2, R_3 (fig. 2.20) sînt conectate în paralel sau derivație, dacă se leagă în același punct B unul din capetele fiecărui rezistor, iar în alt punct C, al doilea capăt al fiecărui rezistor. Fiecare rezistor are între capetele lui aceeași tensiune U, fiind parcurs fiecare de un curent I_1, I_2, I_3. Se caută valoarea rezistenței echivalente, adică rezistența R a unui rezistor care să poată înlocui rezistențele R_1, R_2, R_3, fără a modifica intensitatea $I = \frac{U}{R}$ a curentului din circuit. Se aplică prima teoremă a lui Kirchhoff în nodul B : $I = I_1 + I_2 + I_3$. Ținînd seamă de legea lui Ohm (2, § 2.8) se poate scrie:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

sau:

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

sau încă:

$$\boxed{G = G_1 + G_2 + G_3.}$$

Generalizînd pentru n rezistoare conectate în paralel:

$$\boxed{\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}} \qquad (4)$$

sau

$$\boxed{G = \sum_{k=1}^{n} G_k} \qquad (4')$$

Inversul rezistenței echivalente a unui fascicul de rezistoare conectate în paralel este egal cu suma inverselor rezistențelor acelor rezistoare. Sau: *conductanța echivalentă a mai multor rezistoare conectate în paralel este egală cu suma conductanțelor acelor rezistoare.*

Dacă cele n rezistoare au aceeași rezistență R_1, atunci relația (4) devine:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \ldots \frac{1}{R_1} = \frac{n}{R_1},$$

de unde:

$$R = \frac{R_1}{n},$$

Scanned with OKEN Scanner

adică: rezistența echivalentă R a n rezistențe egale R_1 conectate în paralel este $1/n$ din valoarea unei singure rezistențe.

Receptoarele electrice, alimentate de la aceeași rețea electrică, trebuind să poată funcționa, fie toate odată, fie separat fiecare, se conectează în paralel. Deconectarea unuia dintre ele nu împiedică funcționarea celorlalte. În figura 2.21, L reprezintă mai multe lămpi electrice, R două reșouri, M un electromotor.

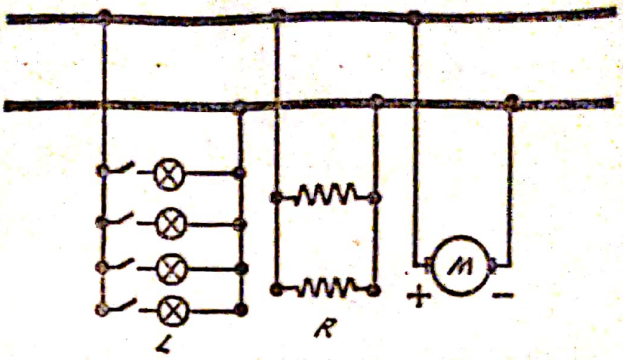


Fig. 2.21

2.20. **Gruparea generatoarelor electrice.** Mai multe generatoare electrice se grupează în serie dacă borna negativă a fiecăruia se leagă cu borna pozitivă a următorului generator (fig. 2.22, *a*). Să considerăm trei generatoare identice cu aceeași t.e.m. E și cu aceeași rezistență interioară r, grupate în serie, având în circuitul exterior un rezistor cu rezistența R. Aplicînd circuitului format teorema a doua a lui Kirchhoff se obține:

$$E + E + E = IR + Ir + Ir + Ir$$

sau:

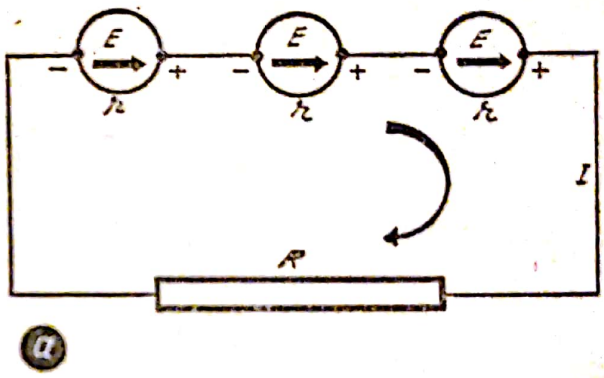
$$3E = I(R + 3r), \quad I = \frac{3E}{R + 3r}.$$

Generalizînd pentru n generatoare identice se obține:

$$\boxed{I = \frac{nE}{R + rn}}. \qquad (5)$$

Gruparea în serie este folosită pentru a obține la bornele rezistenței R o tensiune electrică mare. Ea este avantajoasă numai dacă rezistența interioară a fiecărui generator e mică, deoarece $U = nE - Inr$. Pentru valori mari ale lui r, căderea interioară de potențial Inr crește, deci U scade; cînd $r \approx 0$, $U \approx nE$.

Cele n generatoare identice se pot grupa în paralel, legînd la un loc bornele lor pozitive, iar cele negative, de asemenea, la un loc (fig. 2.22, *b*). Aplicînd



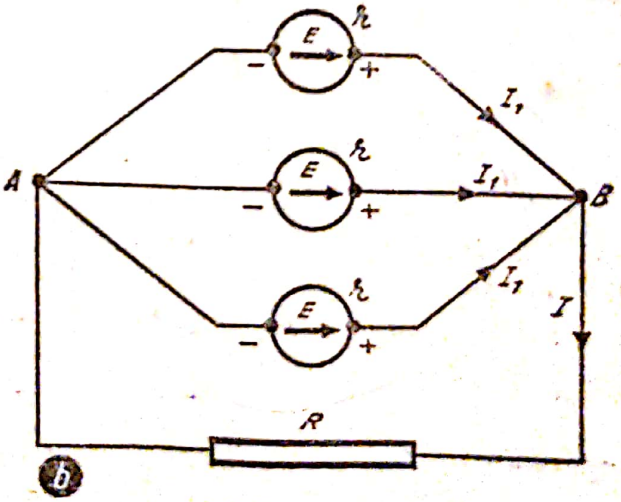


Fig. 2.22

teoremele lui Kirchhoff se constată că ansamblul este echivalent cu un generator, avînd t.e.m. egală cu t.e.m. E a fiecărui generator în parte, iar rezistența interioară $\frac{r}{n}$. Legea lui Ohm (5, § 2.13) ia forma:

$$\boxed{I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}} \qquad (6)$$

Gruparea în paralel este folosită pentru a obține un curent de n ori mai intens decît curentul pe care l-ar putea furniza, fără pericol, un singur generator. Este neapărat necesar, în acest scop, ca generatoarele să fie identice, altfel rezultă curenți inverși în generatoare.

2.21. Șuntul ampermetrelor. O rezistență electrică legată în paralel la bornele unui ampermetru pentru a-i mări domeniul de măsurare se numește *șunt**. Dacă trebuie măsurată o intensitate $I = nI_A$ de n ori mai mare decît intensitatea maximă I_A pe care o poate măsura un instrument de măsurat A (fig. 2.23), se leagă rezistența șunt R_s între bornele A și B ale instrumentului. Intensitatea I se împarte în două părți: una I_A trece prin instrumentul de măsurat A, iar restul I_s trece prin *șunt*. Valoarea acestuia trebuie calculată astfel încît să se cunoască raportul de împărțire a intensității I de măsurat. În nodul A se scrie: $I = I_A + I_s$ sau

$$nI_A = I_A + I_s \qquad I_s = (n-1)I_A.$$

Teorema a doua a lui Kirchhoff dă $I_A R_A - I_s R_s = 0$, de unde:

$$I_s = \frac{I_A R_A}{R_s} = (n-1)I_A.$$

Valoarea șuntului va fi deci:

$$\boxed{R_s = \frac{R_A}{n-1}}. \qquad (7)$$

Dacă R are valoarea dată de (7), atunci curentul de măsurat I este de n ori mai mare decît valoarea I_A citită la ampermetru. Șunturile se fac în formă de sîrme, bare sau plăci, din aliaje cu coeficientul termic neglijabil. Șuntul se montează în interiorul instrumentului de măsurat, ori se introduce într-o cutie separată și se conectează la instrument numai cînd e nevoie de el. Un anumit șunt nu-i valabil pentru orice ampermetru, ci numai pentru acelea care au aceeași rezistență interioară R_A.

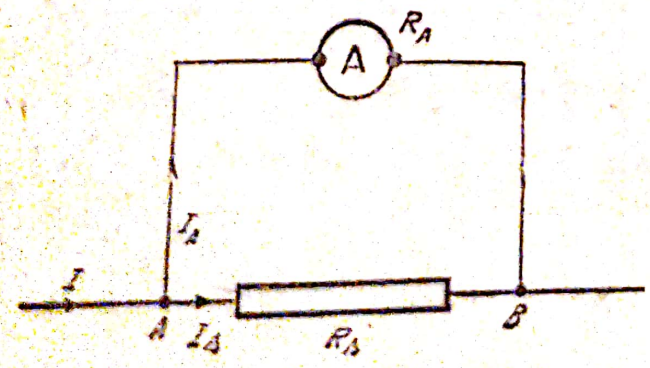


Fig. 2.23

2.22. Voltmetrul și rezistența lui adițională. Pentru a măsura căderea de

* Din limba engleză: *shunt*=linie de ferire.

potențial $U = RI$ de-a lungul unei rezistențe R, parcursă de curentul I (fig. 2.24, *a*), se conectează voltmetrul V la bornele AB ale rezistenței (fig. 2.24, *b*). Dar voltmetrul însuși are o rezistență R_v, încît între punctele A și B va fi o rezistență echivalentă R' dată de relația:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_v} = \frac{R + R_v}{R_v R}.$$

$$R' = \frac{R}{1 + \frac{R}{R_v}} < R.$$

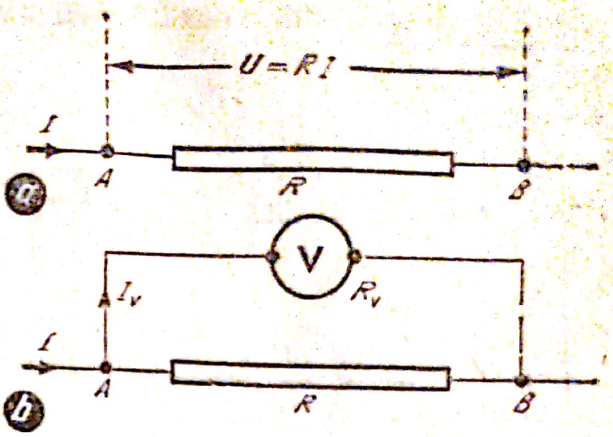


Fig. 2.24

Deci tensiunea măsurată $U_{măs} = IR' < U$.

Pentru ca tensiunea măsurată să fie cea adevărată U, trebuie ca $R' \approx R$, adică R_v să fie foarte mare față de R. Așadar, *voltmetrul trebuie să aibă rezistență mare și se conectează în paralel cu rezistorul, la capetele căruia trebuie să măsoare tensiunea.*

Dacă tensiunea de măsurat U este mai mare decît tensiunea maximă U_v pe care o poate măsura voltmetrul V, adică $U = nU_v$ (fig. 2.25), se leagă în serie cu acesta o rezistență adițională R_a. Pe rezistența R_a se distribuie excesul de tensiune U_a.

Se va putea scrie $I_v = \frac{U_v}{R_v} = \frac{U_a}{R_a}$. Dar $U = U_v + U_a \Rightarrow U_a = U - U_v = (n-1)U_v$.

Introducînd în expresia lui I_v se obține: $\frac{U_v}{R_v} = \frac{(n-1)U_v}{R_a}$. De unde

$$\boxed{R_a = R_v(n-1).} \qquad (S)$$

2.23. Divizorul de tensiune (potențiometrul). Pentru a utiliza numai o parte U_1 din tensiunea U de la bornele unui generator se folosește un aparat numit divizor de tensiune sau potențiometru, care constă dintr-un reostat cu

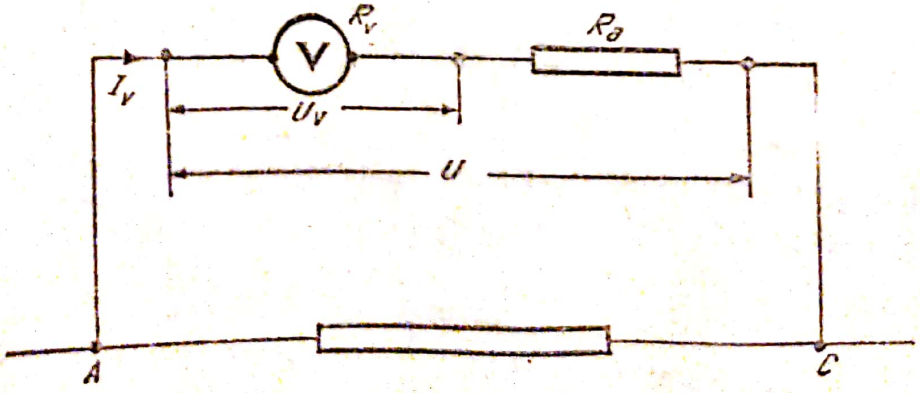


Fig. 2.25

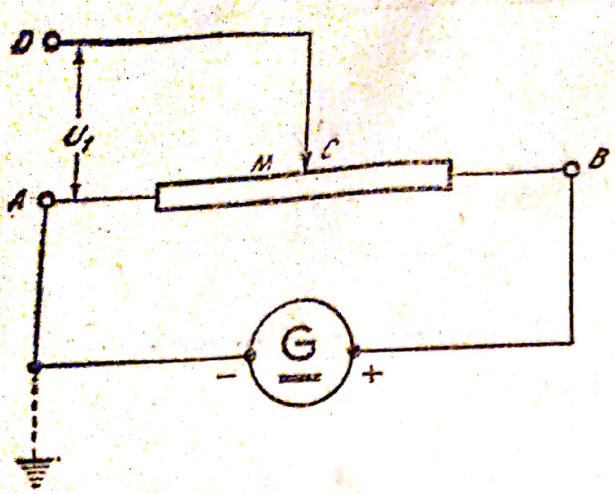


Fig. 2.26

cursor, cu trei borne A, B, D (fig. 2.26). La bornele AB este conectată tensiunea U furnizată de generator; la bornele AD se conectează receptorul care primește tensiunea $U_1 \leqslant U$. Valoarea lui U_1 depinde de poziția cursorului C: ea scade cînd C este deplasat către A și crește cînd C este deplasat spre B. Dacă borna A este legată la pămînt printr-un fir metalic, borna A are potențialul zero, deci U_1 poate crește de la zero la $+U$. Dacă se leagă la pămînt borna B, atunci U_1 poate varia de la zero la $-U$. Punînd la pămînt mijlocul M al reostatului, U_1 poate varia de la zero la $-\frac{U}{2}$ cînd C este deplasat de la M către A, ori de la zero la $+\frac{U}{2}$, cînd cursorul C este deplasat de la M către B.

D. Măsurarea rezistențelor electrice

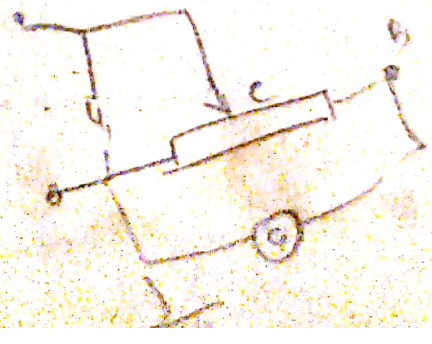
2.24. Măsurarea unei rezistențe mari. Mărimea rezistenței se deduce din legea lui Ohm: $R = \frac{U}{I}$. Trebuie măsurată tensiunea U la capetele rezistenței R și curentul I care circulă prin R. Se folosește montajul din figura 2.27. Ampermetrul A dă valoarea exactă a lui I. Tensiunea U măsurată de V conține și tensiunea la bornele ampermetrului $U_A = IR_A$, care trebuie scăzută din U. Valoarea R a rezistenței de măsurat va fi deci:

$$R = \frac{U - IR_A}{I}.$$

Rezistența ampermetrului este însă foarte mică față de valoarea lui R de măsurat, deci se poate neglija IR_A față de U, încît:

$$R \approx \frac{U}{I}$$

valoare foarte apropiată de valoarea reală R.



Scanned with OKEN Scanner

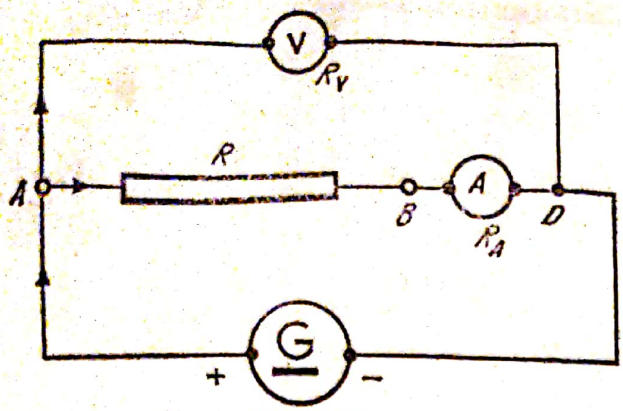


Fig. 2.27

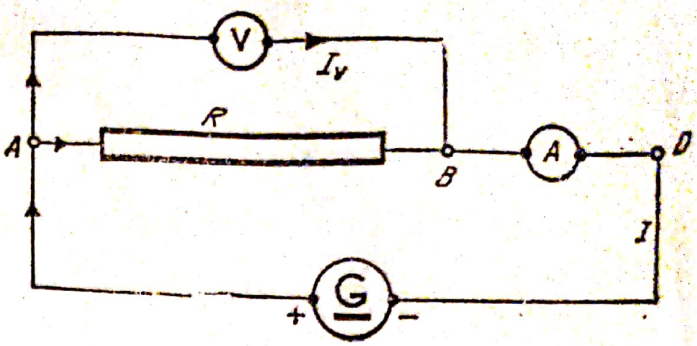


Fig. 2.28

2.25. Măsurarea unei rezistenţe mici. Montajul folosit în acest caz este cel din figura 2.28. Voltmetrul V indică valoarea exactă U dintre bornele A şi B ale lui R. Însă intensitatea I dată de A conţine şi intensitatea $I_v = \frac{U_v}{R_v}$ care circulă prin voltmetru şi deci trebuie scăzută din I.

Valoarea R a rezistenţei de măsurat va fi deci:

$$R = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U_v}{R_v}}.$$

Deoarece voltmetrul are rezistenţa R_v foarte mare faţă de R, I_v poate fi neglijat faţă de I, încît:

$$R \approx \frac{U}{I},$$

valoare foarte apropiată de valoarea reală R.

2.26. Compararea a două rezistenţe cu puntea cu fir. Se poate compara o rezistenţă necunoscută R cu o alta cunoscută R_0, folosind montajul din figura 2.29, numit *puntea cu fir*. Nu interesează valoarea rezistenţelor R_1 şi R_2, dar raportul lor trebuie să poată fi determinat cu exactitate. Între punctele C şi D se află puntea propriu-zisă, care conţine un instrument foarte sensibil de măsurat curentul, galvanometrul G. Punctul C poate aluneca între A şi B pe un fir conductor calibrat. Acest fir constituie două rezistoare de rezistenţe R_1 şi R_2, legate în serie. Se deplasează cursorul pe fir pînă într-un punct C, cînd prin puntea CD nu mai circulă curent electric: acul galvanometrului nu mai deviază la închiderea-

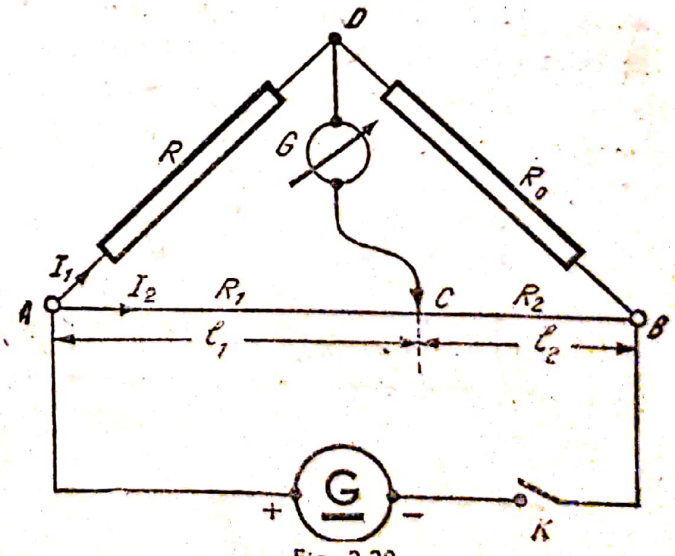


Fig. 2.29

deschiderea repetată a întrerupătorului K. Înseamnă că potențialele din D și din C sînt egale, prin R și R_0 circulă același curent I_1, iar prin R_1 și R_2 circulă același curent I_2. Se poate scrie că tensiunile U_{AD} și U_{AC} sînt egale între ele:

$$I_1 R = I_2 R_1$$

și, de asemenea, tensiunile U_{DB} și U_{CB}:

$$I_1 R_0 = I_2 R_2.$$

Se poate deduce prin împărțire: $\frac{R}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}$, de unde: $R = \frac{R_1}{R_2} R_0$.

Notînd cu l_1, respectiv l_2, lungimile firului, care constituie rezistențele R_1 și R_2, se observă că:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2},$$

materialul fiind același, ρ este același. (Secțiunea firului este constantă.) Prin urmare:

$$\boxed{R = \frac{l_1}{l_2} R_0.}$$

Lungimile l_1 și l_2 se află cu ajutorul unei rigle gradate, așezate de-a lungul firului AB. Valorile cele mai exacte pentru R se obțin cînd R_0 nu diferă prea mult de R. Ca rezistență etalon R_0 se folosește, de obicei, o cutie de rezistențe, din care se poate alege cel mai convenabil R_0.

2.27. **Cutia de rezistențe.** Este o grupare de rezistoare avînd rezistențe etalonate, legate în serie și introduse într-o cutie de lemn. Rezistoarele sînt făcute din fir de manganină sau constantan, înfășurate bifilar (pentru reducerea efectelor magnetice) pe cilindri din material izolator. Capetele fiecărui rezistor sînt lipite la cîte un plot (lamă groasă) de alamă. Diferitele ploturi sînt separate unul de altul (fig. 2.30) prin spații goale. În aceste spații se pot introduce fișe care pun în contact două ploturi alăturate. Valorile rezistențelor sînt scrise pe capacul cutiei, în dreptul fișei corespunzătoare. Aceste valori sînt așa fel alese încît se pot realiza variate combinații de valori. Presupunem situația din figura 2.30 unde sînt introduse fișele *1*, *2*, *3* și *6*, iar fișele *4*, *5*, *7* și *8* sînt scoase. Curentul intră prin plotul *A*, trece prin cele trei fișe următoare, care scurtcircuitează rezistențele 1 Ω, 2 Ω, și 2 Ω, trece apoi prin rezistențele de 5 Ω și 10 Ω, prin fișa care scurtcircuitează a doua rezistență de 10 Ω, continuă să treacă prin rezistențele 20 Ω și 50 Ω și iese prin plotul final *B*. Curentul trece numai prin rezistoarele corespunzătoare fișelor scoase. În situația

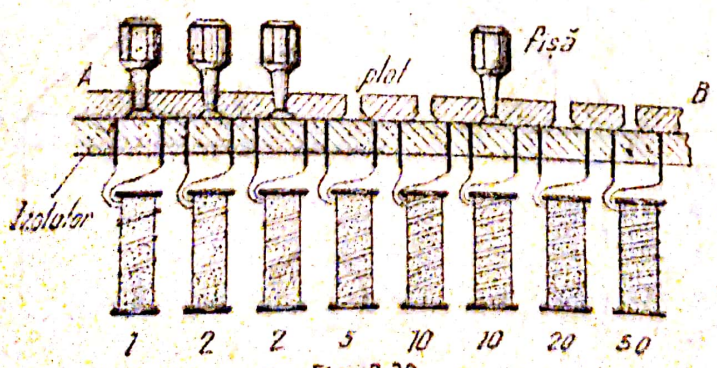
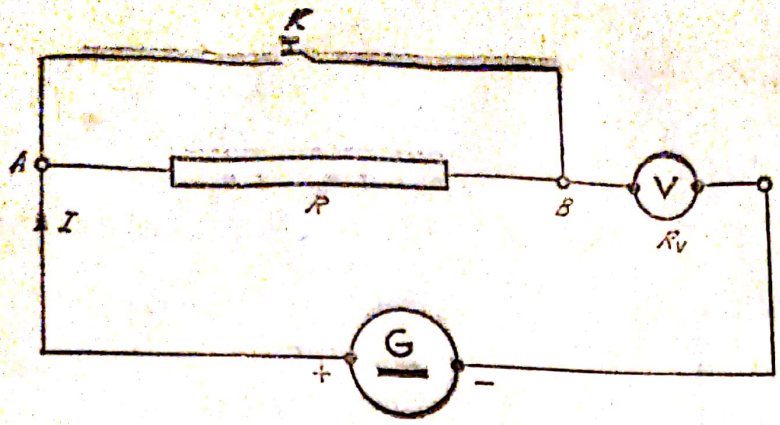
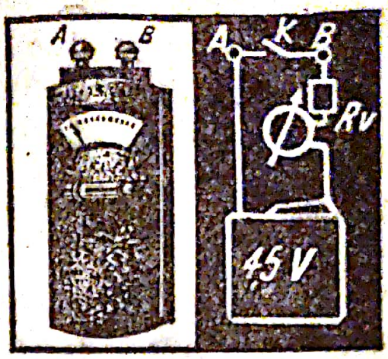


Fig. 2.30



a)



b)

Fig. 2.31

analizată aici se introduce o rezistență de $5\,\Omega + 10\,\Omega + 20\,\Omega + 50\,\Omega = 85\,\Omega$. Există și alte tipuri de cutii de rezistențe cu fișe sau cu manetă.

2.28. **Ohmmetrul.** Pentru măsurarea rapidă și directă a rezistențelor nu prea mici se folosește ohmmetrul simplu. Se bazează pe măsurarea unei rezistențe cu ajutorul unui voltmetru V (fig. 2.31, *a*) cu rezistența R_v cunoscută. La închiderea întrerupătorului K, rezistența de măsurat este scurtcircuitată, iar voltmetrul V indică tensiunea U de la bornele generatorului. La deschiderea întrerupătorului K, voltmetrul V indică numai tensiunea U_v, de la bornele sale. La bornele rezistenței de măsurat R va fi deci o tensiune

$U_1 = U - U_v = IR = \frac{U_v}{R_v} R$. De aici se deduce:

$$R = \frac{U - U_v}{U_v} R_v.$$

Întregul montaj, inclusiv bateria de alimentare, se introduce într-o cutie, lăsându-se accesibile în exterior bornele între care se conectează rezistența de măsurat (fig. 2.31, *b*). Scala este gradată în volți și în ohmi, și anume, astfel încît la scurtcircuitare (întrerupătorul închis), cînd deviația e maximă, acul indică valoarea zero a rezistenței.

Probleme rezolvate

1. Se dă rețeaua din figura 2.32, în care: $R_1 = R_4 = 19\,\Omega$, $R_2 = R_3 = 4\,\Omega$, $R_5 = 1\,\Omega$, $R_6 = 5\,\Omega$ și $I_6 = 5\,A$. Sensul curenților e considerat cel de pe figură. Se cer: t.e.m. și curenții din ramurile R_1, R_2, R_3, R_4, R_5.

Rezolvare. Se aplică teorema lui Kirchhoff la nodurile A, B, C:

$$I_6 = I_1 + I_2$$
$$I_2 + I_5 = I_4$$
$$I_6 = I_3 + I_4$$

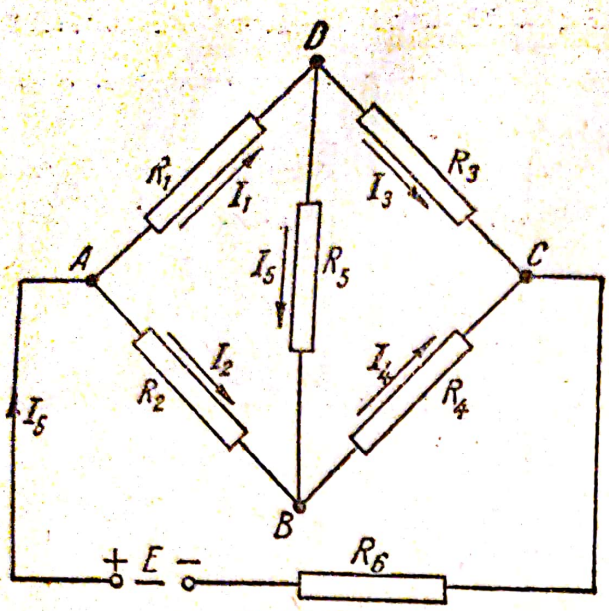


Fig. 2.32

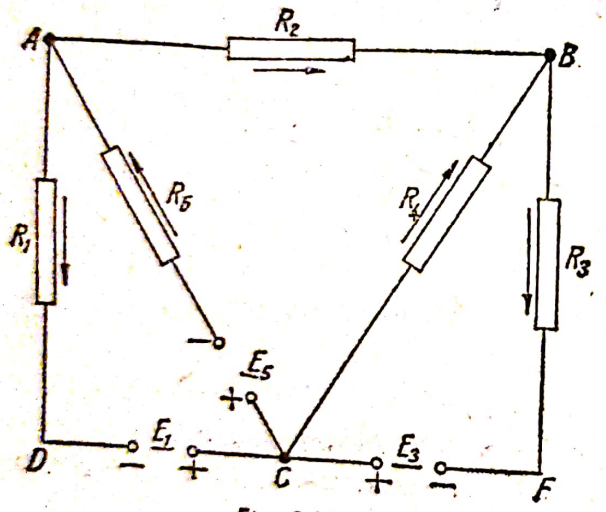


Fig. 2.33

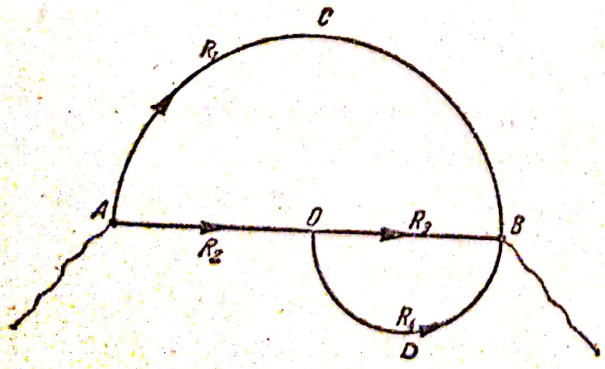


Fig. 2.34

și la ochiurile $ABCA$, $ADBA$, $DCBD$:

$$I_2R_2 + I_4R_4 + I_6R_6 = E$$
$$I_1R_1 + I_5R_5 - I_2R_2 = 0$$
$$I_3R_3 - I_4R_4 - I_5R_5 = 0.$$

Înlocuind datele din enunț se obține sistemul de ecuații:

$$5 = I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$
$$I_4 = I_2 + I_5$$
$$E = 4I_2 + 19I_4 + 25$$
$$0 = 19I_1 + I_5 - 4I_2$$
$$0 = 4I_3 - 19I_4 - I_5.$$

Rezolvînd sistemul se obțin următoarele rezultate:

$$I_1 = I_4 = 1\text{A}$$
$$I_2 = I_3 = 4\text{A}$$
$$I_5 = -3\text{A}$$
$$E = 60\text{V}.$$

Se observă că sensul adevărat al lui I_5 este opus celui considerat inițial în figura 2.32.

2. În rețeaua din figura 2.33 se dau: $E_1 = 205$ V, $E_3 = 10$ V, $E_5 = 136$ V, $R_1 = 5\ \Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$, $R_3 = R_5 = 2\ \Omega$ și $R_4 = 1\ \Omega$. Se cer curenții din fiecare ramură.

Rezolvare. Se aplică teoremele lui Kirchhoff:

la nodul A: $I_5 - I_1 - I_2 = 0$,
la nodul C: $I_1 + I_3 - I_5 - I_4 = 0$,
la ochiul $ACDA$: $-I_1R_1 - I_5R_5 = E_5 - E_1$,
la ochiul $ABCA$: $I_5R_5 + I_2R_2 - I_4R_4 = -E_5$,
la ochiul $BFCB$: $I_4R_4 + I_3R_3 = E_3$.

Înlocuind aici datele din enunț, se obține sistemul de ecuații:

$$I_5 - I_1 - I_2 = 0$$
$$I_1 + I_3 - I_5 - I_4 = 0$$
$$-5I_1 - 2I_5 = 136 - 205$$
$$2I_5 + 4I_2 - I_4 = -136$$
$$I_4 + 2I_3 = 10.$$

Rezolvînd sistemul se obțin următoarele rezultate: $I_1 = 17$ A; $I_2 = -25$ A; $I_3 = -5$A; $I_4 = 20$ A; $I_5 = -8$A.

Se constată că sensurile adevărate ale intensităților I_2, I_3 și I_5 sînt opuse sensurilor considerate inițial (fig. 2.33).

3. La o porțiune dreaptă a unui fir conductor omogen AB (fig. 2.34) se sudează, din același

Scanned with OKEN Scanner

material, alte două conductoare semicirculare ACB și ODB, având diametrele AB, respectiv $OB = \frac{AB}{2}$. Sistemul de conductoare este parcurs de un curent de 100A intrînd prin A și ieșind prin B. Care sînt intensitățile în ramurile ACB și ODB?

(Concursul de admitere la Facultatea de fizică, în 1959).

Rezolvare. Se notează rezistențele ramurilor cu $R_2 = R_3 = R$, $R_1 = \pi R$, $R_4 = \frac{\pi R}{2}$.

Se aplică teoremele lui Kirchhoff:

la nodul A: $I = I_1 + I_2$

la nodul O: $I_2 = I_3 + I_4$

la ochiul $ACBA$: $I_1R_1 - I_3R_3 - I_2R_2 = 0$

la ochiul $OBDO$: $I_3R_3 - I_4R_4 = 0$

sau:

$$I - I_1 - I_2 = 0$$

$$I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

și:

$$\pi RI_1 - RI_3 - RI_2 = 0 \quad ; \quad \pi I_1 - I_3 - I_2 = 0$$

$$RI_3 - \frac{\pi R}{2} I_4 = 0 \quad ; \quad 2I_3 - \pi I_4 = 0.$$

Rezolvînd sistemul se obțin:

$$I_1 = \frac{2(\pi + 1)I}{\pi^2 + 4\pi + 2} \approx 33{,}8 \text{ A}; \qquad I_4 = \frac{2\pi I}{\pi^2 + 4\pi + 2} \approx 25{,}6 \text{ A}.$$

Întrebări, exerciții, probleme

1. Care sînt elementele componente ale unei rețele electrice?
2. Cum trebuie legate consumatoarele pentru a putea funcționa fiecare separat?
3. Să se compare legarea în serie cu legarea în paralel a consumatoarelor. În ce scop se face fiecare? Ce avantaje au?
4. Să se compare legarea în serie cu legarea în paralel a generatoarelor. În ce scop se face fiecare? Ce avantaje au?
5. Ce schimbare se produce cu intensitatea dintr-un circuit serie dacă se chimbă locul elementelor lui componente?
6. Să se compare șuntul cu rezistența suplimentară în privința scopului și rolului pe care îl joacă.
7. Ce deosebire este între un reostat cu cursor și un potențiometru? La ce servește fiecare?
8. În ce cazuri se poate produce un scurtcircuit și ce urmări poate avea?
9. Generatoarele cu $E_1 = 48$ V și $E_2 = 45$ V având rezistențe interioare neglijabile sînt legate ca în figura 2.35, prin rezistoarele de rezistențe $R_1 = 2\,\Omega$, $R_2 = 3\,\Omega$ și $R_3 = 4\,\Omega$. Se cer intensitățile în fiecare ramură.

Răspuns: 6 A; 3 A; 9 A.

10. Două elemente galvanice identice, cu t.e.m. de 2V, se leagă în serie printr-un rezistor de rezistență $R = 3\,\Omega$. Știind că unul singur din cele două elemente ar debita prin R curentul

Scanned with OKEN Scanner

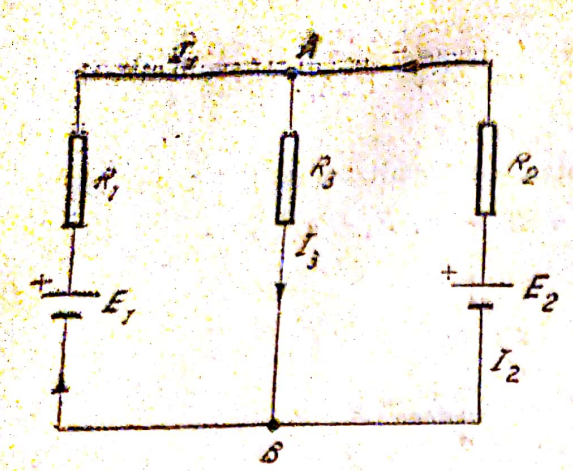


Fig. 2.35

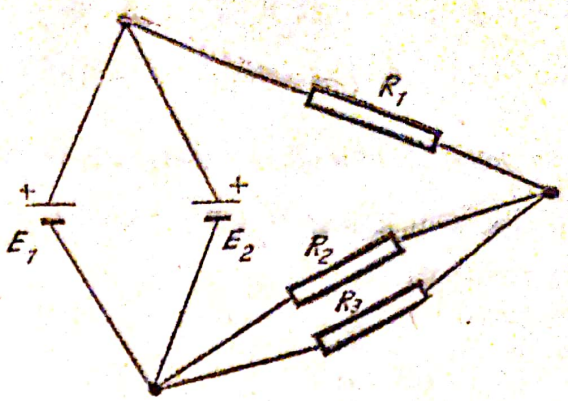


Fig. 2.36

de 0,5 A, se întreabă care-i curentul în cazul legării în serie? Dar dacă cele două elemente ar fi legate în paralel, printr-un conductor de aceeași rezistență?

Răspuns: 0,8 A; 0,57 A.

11. Conductorul de rezistență R din problema precedentă se taie în trei părți egale și se montează ca în figura 2.36. Se cer curenții din fiecare latură.

Răspuns: 1 A; 0,5 A; 0,5 A.

12. Unui potențiometru cu rezistența de 4k Ω i se aplică la borne o tensiune de 110 V. Un voltmetru cu rezistența de 10 kΩ este legat între un capăt al potențiometrului și cursor. Ce tensiune indică voltmetrul, cînd cursorul se află la mijlocul înfășurării potențiometrului?

Răspuns: 50 V.

13. Un circuit este format din nouă conductoare, avînd fiecare rezistența r. Cele nouă conductoare formează un hexagon, cu diagonalele plecînd din același vîrf A. Se cere rezistența echivalentă a circuitului între punctele A și B, de la extremitatea diagonalei celei mai lungi.

Răspuns: $\frac{5r}{11}$ Ω.

14. O baterie debitează, pe o rezistență exterioară de 10 Ω, un curent de 3A. Dacă se înlocuiește rezistența exterioară cu una de 20 Ω, atunci curentul are 1,6 A. Ce tensiune electromotoare și ce rezistență interioară are bateria?

Răspuns: 34,3 V; 1,43 Ω.

15. Două elemente galvanice E_1 și E_2, cu t.e.m. de 2 V și rezistența interioară de 4 Ω fiecare (fig. 2.37) alimentează o rețea electrică formată din rezistoare de rezistențe $R_1 = 5$ Ω, $R_3 = 4$ Ω, $R_3 = 2{,}1$ Ω. Ce tensiune este la bornele rezistorului R_3, și ce curent circulă prin rezistorul R_2?

Răspuns: 0,665 V; 0,176 A.

16. Un voltmetru a cărui schemă se vede în figura 2.38 are scala împărțită în 150 de diviziuni. El are trei borne pentru măsurarea tensiunilor pînă la 3 V, pînă la 15 V și pînă la 150 V. La trecerea prin instrument a unui curent de 1 mA, acul deviază cu 50 de diviziuni. Care este rezistența instrumentului pentru fiecare sensibilitate?

Răspuns: 1 000 Ω; 5 000 Ω; 50 000 Ω.

17. Ce valoare trebuie să aibă șuntul unui galvanometru cu ac indicator, a cărui scală are 100 de diviziuni, iar fiecare diviziune corespunde unui curent de 1μA? Galvanometrul are rezistența interioară de 150 Ω și urmează a fi utilizat la măsurarea curenților pînă la 1 mA.

Răspuns: 16,67 Ω.

Scanned with OKEN Scanner

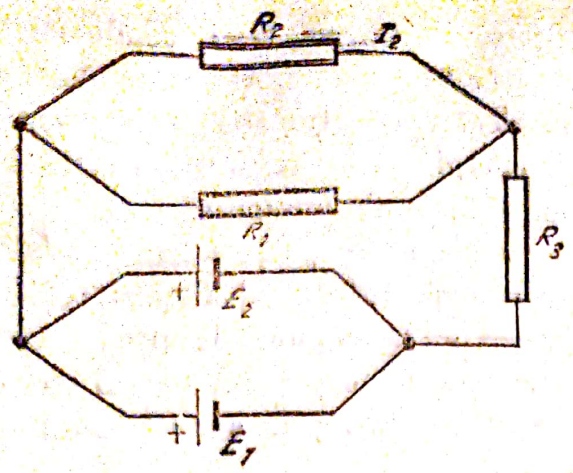


Fig. 2,37

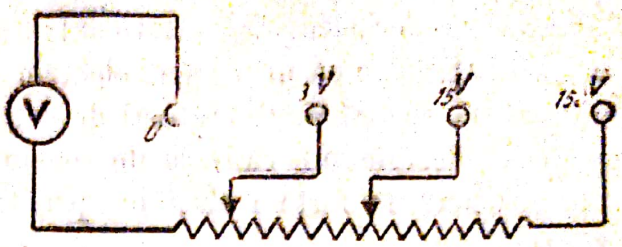


Fig. 2,38

18. Un ampermetru are scala de 100 de diviziuni și măsoară 10 μA pentru o diviziune. Are rezistența interioară 100 Ω. Se cer:

a. Cum se poate măsura cu acest ampermetru, astfel ca o diviziune să corespundă la 1 V?

b. Cum se poate extinde domeniul de măsurare al ampermetrului pentru a măsura curenți pînă la 1 A?

(Concursul de admitere la Facultatea de fizică, București, 1964).

Răspuns: $R_s = 99\,900\ \Omega$; $R = 0{,}1\ \Omega$.

19. O rezistență R a fost măsurată folosind un ampermetru care are $R_A = 0{,}5\ \Omega$ și un voltmetru de rezistență $R_v = 500\ \Omega$, conectat la bornele sursei. Aceasta are rezistența interioară neglijabilă. Voltmetrul a indicat 20 V, iar ampermetrul 4 A. Se cer:

a. Valoarea exactă a lui R.

b. Cînd este mai precisă măsurătoarea lui R, în cazul de mai sus, ori cînd voltmetrul e conectat la bornele rezistorului de rezistență R?

(Olimpiada Fizică, etapa republicană, 1964.)

Răspuns: 4,5 Ω; în cazul *b*.

20. Un circuit este format dintr-o sursă cu t.e.m. de 18 V și $r = 2\ \Omega$, un fir de cupru cu rezistența R_1 (avînd diametrul de 0,2 mm și lungimea 6,28 m), un reostat variabil și un ampermetru cu rezistență neglijabilă, toate în serie.

a. Care este tensiunea la bornele sursei, dacă ampermetrul indică 1 A?

b. La bornele firului de cupru se leagă în paralel al doilea fir de rezistență R_2 din același material și aceeași lungime cu primul, dar de secțiune dublă. Ce valoare trebuie să aibă reostatul R pentru ca ampermetrul să indice 1 A?

c. M și N fiind mijloacele firelor R_1 și R_2, ce va indica un voltmetru legat între aceste 2 puncte?

(Olimpiada Fizică, etapa regională, 1963.)

Răspuns: 16 V; 14,83 Ω; 0 V.

E. Energie electrică

2.29. Energia electrică dezvoltată într-un circuit electric. Prin efectele sale, curentul electric are numeroase aplicații practice. În toate aceste aplicații *prin intermediul cîmpului electric din interiorul conductoarelor, energia generatorului este trans-*

misă receptoarelor, unde se transformă în diferite forme de energie. Deci, conductorul electric ghidează transmiterea energiei de la generator la receptor. Astfel, în electromotorul unui strung sau al tramvaiului, energia electrică se transformă în energie mecanică; în sobe electrice, radiatoare, reșouri, energia electrică se transformă în energie internă; în becul electric ea se transformă în energie luminoasă etc.

Energia electrică, dezvoltată într-un conductor electric, se poate calcula în felul următor. Se știe că un curent electric constă din transportul dirijat al purtătorilor de sarcină electrică. Purtătorii de sarcină q se mișcă de la un punct la altul al circuitului electric sub căderea de tensiune U dintre cele două puncte. Lucrul mecanic efectuat de forțele electrice pentru transportul sarcinii q în curent continuu va fi:

$$L = Uq = UIt.$$

Acest lucru mecanic măsoară energia care se transformă în circuit în intervalul de timp t, din energie electrică în alte forme de energie:

$$\boxed{W = UIt}. \qquad (1)$$

Așadar, *energia electrică dezvoltată într-un circuit de curent continuu este proporțională cu tensiunea, cu intensitatea și cu durata de timp considerată.* (Energia electrică nu este energia curentului electric, ci a cîmpului electromagnetic din conductor. Din relația (1) se observă că energia poate varia chiar dacă I este constant.)

Pe întregul circuit închis al unui curent continuu, alimentat de un generator cu t.e.m. E și rezistența interioară r, energia electrică dezvoltată de sursă va fi:

$$\boxed{W = EIt}. \qquad (2)$$

Această energie provine din energiile neelectrice, care în generator (v. paragraful 2.2) se transformă în energie electrică.

Energia electrică se măsoară în joule, în *SI*. În practică se mai folosește o unitate mai mare, numită kilowatt-oră. ($1\ \text{kWh} = 10^3 \cdot 3\,600\ \text{W} \cdot \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6$ joule).

2.30. **Puterea electrică.** Energia dezvoltată în unitatea de timp se numește putere. Puterea electrică dezvoltată pe o porțiune de circuit va fi deci:

$$\boxed{P = UI}. \qquad (3)$$

iar puterea dezvoltată de o sursă va fi:

$$\boxed{P = EI}. \qquad (4)$$

Unitatea de putere este wattul: $\text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$. În practică se folosește kilowattul, un multiplu al wattului.

Scanned with OKEN Scanner

2.31. Efectul electrocaloric: legea lui Joule. În orice conductor parcurs de curent electric se dezvoltă căldură (efect electrocaloric), cum s-a arătat mai înainte (§2.4).

În procesul de conducție electrică, energia electromagnetică a cîmpului se transformă ireversibil în energie internă a conductoarelor și se transmite în mediul ambiant sub formă de căldură. Pe baza principiului conservării energiei, cantitatea de căldură Q dezvoltată în regim staționar este egală cu energia electrică transformată:

$$\boxed{Q = UIt = RI^2t}. \qquad (5)$$

Fizicianul J.P. Joule (1818—1889) a măsurat experimental (1841) cantitatea de căldură dezvoltată de curentul electric și a găsit legea scrisă mai sus sub formă matematică.

James Prescott Joule (1818—1889). Fizician englez. A studiat efectul electrotermic și a descoperit legea care îi poartă numele (1846). A determinat experimental echivalentul mecanic al caloriei (1845). A studiat răcirea gazelor prin destindere și a descoperit că energia internă a gazului perfect nu depinde de volum (1852).

Cantitatea de căldură dezvoltată la trecerea curentului electric printr-un conductor este proporțională cu rezistența, cu pătratul intensității și cu timpul cît circulă curentul electric.

Aceasta este legea lui Joule sau legea efectului electrocaloric. Cantitatea de căldură se exprimă aici în joule, rezistența în ohmi, intensitatea în amperi și timpul în secunde.

Energia disipată* într-un rezistor va fi deci:

$$P = RI^2,$$

iar în întregul circuit va fi:

$$P = (R + r)I^2.$$

Randamentul η al unui circuit închis de curent continuu, format dintr-un generator cu t.e.m. E și rezistența interioară r, precum și dintr-un receptor cu rezistența R, va fi:

$$\eta = \frac{\text{puterea primită de receptor}}{\text{puterea dezvoltată de sursă}},$$

adică:

$$\eta = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}, \text{ sau } \eta = \frac{RI^2}{(R + r)I^2} = \frac{R}{R + r}.$$

2.32. Căderea de tensiune pe linie. Să considerăm o linie bifilară, cu rezistența R (fig. 2.39), prin care este alimentat un receptor R_1 de către un generator G, care are tensiunea la borne U. Prin linie circulă un curent I și se dezvoltă o cantitate de căldură care se risipește în atmosferă. De asemenea se produce pe linie o cădere de ten-

* Transformată în mod ireversibil în energie internă și transmisă mediului înconjurător sub formă de căldură.

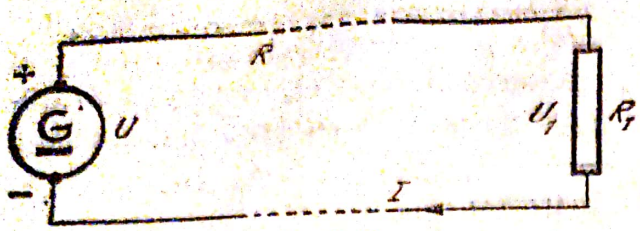


Fig. 2.39

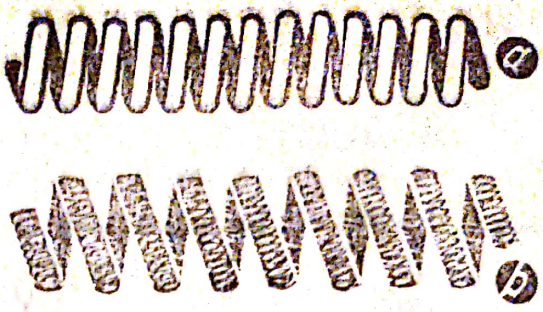


Fig. 2.40

siune $\Delta U = U - U_1 = RI$. La bornele receptorului R_1 ajunge tensiunea $U_1 = U - \Delta U = U - RI$. Puterea utilă, cedată receptorului, va fi $P_u = U_1 I$, iar puterea totală, cedată de generator liniei și receptorului, va fi $P = UI$. Randamentul de transmisie a energiei prin această linie va fi:

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{U_1 I}{UI} = \frac{U - RI}{U} = 1 - \frac{RI}{U}. \qquad (6)$$

Pentru ca acest randament să fie cît mai mare trebuie ca fracția $\frac{RI}{U}$ să fie cît mai mică. Pentru o anumită putere electrică $P = UI$ de transportat pe o linie, transportul de energie este cu atît mai economic cu cît tensiunea U va fi mai mare și cu cît intensitatea I va fi mai mică.

2.33. **Aplicații ale efectului electrocaloric.** Efectul electrocaloric, adică încălzirea conductoarelor prin care circulă curent electric, are numeroase aplicații practice.

a. *Lămpi electrice cu incandescență.* Un corp încălzit foarte puternic devine incandescent: se înroșește, devine luminos și radiază în spațiul înconjurător, căldură și lumină. Firele metalice prin care circulă curentul electric pot deveni și ele incandescente, adică emițătoare de radiații luminoase. Pe acest fenomen se bazează lămpile cu incandescență, numite obișnuit becuri electrice. Filamentele becurilor electrice se fac din metale care se topesc greu, ca tungsten, osmiu, tantal. Tubul de sticlă în care se găsește filamentul este golit de aer sau poate fi umplut cu un gaz inert, de exemplu kripton, la o presiune destul de mică. Temperatura filamentului incandescent trece de 2 800°C, pentru ca lumina emisă să fie mai apropiată de lumina zilei. Firul metalic foarte subțire, cu diametrul de cîteva sutimi de milimetru, din care este făcut filamentul, este spiralat (fig. 2.40, *a*) sau dublu spiralat (fig. 2.40, *b*), pentru a spori randamentul lămpii. Mărimea și forma becului depind de puterea consumată, precum și de scopul pentru care este el construit. Lămpile electrice pentru aparatele de proiecție au filamentul concentrat pe o suprafață cît mai mică.

Există și alte feluri de lămpi electrice, cum sînt lămpile fluorescente care vor fi studiate mai departe, nefiind o aplicație a efectului Joule.

b. *Aparate de încălzit electrice.* Acestea au cele mai variate forme și întrebuințări: radiator, fier de călcat, reșou, ciocan de lipit, sobă etc. Toate aceste aparate au același principiu de funcționare. Sursa lor de căldură este un rezistor cu rezistivitate mare; firul rezistorului este parcurs de curentul electric, care îl încălzește. Dimensiunile

firului rezistorului depind de puterea consumată de aparat; un fier de călcat poate avea o putere de 400—1000 W, un ciocan de lipit 50—250 W etc. Aparatele de uz casnic funcționează la temperaturi sub 1 000°C, încît rezistorul lor poate fi făcut din fir de crom-nichel. Firul este înfășurat pe un suport izolator de mică sau dintr-o masă ceramică.

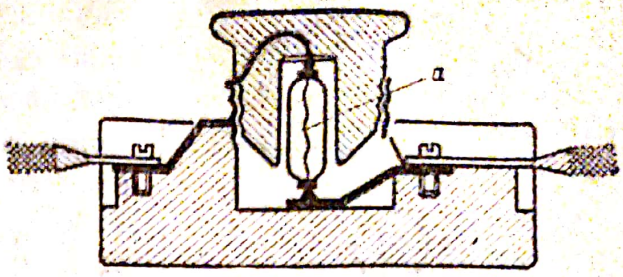


Fig. 2.41

În tehnică sînt necesare temperaturi mai ridicate. În acest scop, rezistențele pot fi construite din fir de molibden, care suportă 2 100°C, din fir de tungsten care suportă 2 800°C etc. Se pot construi sobe și cuptoare electrice, care să funcționeze la o temperatură constantă, stabilită de mai înainte. Acestea se numesc *termostate*.

c. *Siguranțe fuzibile*. Din cauza unor accidente, a unei greșite manipulări sau a unei cereri prea mari de curent electric se poate întîmpla ca în conductorii electrici să se dezvolte prea multă căldură. Conductorii se pot încălzi peste valorile suportate de instalație, care se poate strica sau se pot produce incendii*.

În afară de aceasta se pot ivi scurtcircuite, din care cauză intensitatea curentului depășește valorile suportate de conducte și se pot produce incendii.

Pentru a proteja instalația de asemenea accidente se intercalează pe circuit un fir subțire, *a*, din figura 2.41, dintr-un material ales în așa fel încît să se topească dacă intensitatea curentului trece peste o anumită valoare. Un asemenea fir care se topește și întrerupe curentul se numește siguranță fuzibilă. Locul siguranței fuzibile în circuit se alege în așa fel, încît în orice împrejurare de scurtcircuit curentul electric să treacă prin ea. Firele pentru siguranțe fuzibile se fac din aliaje care se topesc ușor. În tabela de mai jos sînt date valorile curentului maxim (I_{max}) pe care îl suportă firele de Cu de diferite secțiuni (S):

S mm²	R/l (Ω/km)	$I_{maximum}$ (A) suportat
0,50	35,00	10
0,75	23,33	13
1,00	17,50	15
1,50	11,67	20
2,50	7,00	27

Există și siguranțe numite „automate", care se bazează pe fenomene electromagnetice.

c. *Cuptoare electrice cu rezistență*. Pentru prelucrarea pieselor metalice în industrie este nevoie de încălzirea sau chiar de topirea lor. Încălzirea pieselor metalice se poate face în „cuptoare cu rezistență". Asemenea cuptoare servesc în metalurgie la călirea oțelurilor, în industria sticlei la topirea sticlei etc. Căldura necesară este

* Se poate întîmpla, de asemenea, ca forțele de interacțiune între conductorii parcurși de curent să fie prea mari.

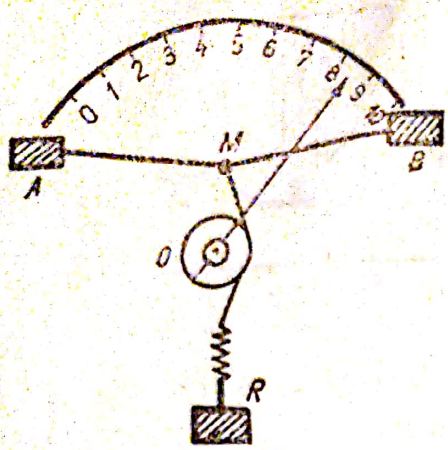


Fig. 2.42

produsă prin efect Joule, adică prin trecerea curentului electric prin niște rezistori care înconjură un creuzet alcătuit din substanță refractară. Temperatura cuptorului poate fi reglată ușor prin variarea rezistenței.

f. *Instrumente de măsurat.* Deoarece cantitatea de căldură dezvoltată depinde de intensitatea curentului electric care trece printr-un rezistor cu rezistență constantă, se construiesc instrumente de măsurat ale intensității curentului electric bazate pe această proprietate a curentului, numite ampermetre termice.

Între două borne A și B (fig. 2.42) este montat un fir metalic din aliaj de platină, cu iridiu sau argint. El este întins de un alt fir fixat în M trecut peste o rotiță O, solidară cu un ac indicator. Celălalt capăt al firului este prins printr-un resort R de aparat. La trecerea curentului prin firul AB, acesta se dilată. Resortul întinde firul, încît acul deviază în fața unui cadran gradat. Întrucît cantitatea de căldură este proporțională cu I^2, deviația acului nu depinde de sensul curentului electric; de aceea, instrumentele termice se pot folosi și la măsurări de curent alternativ, adică a curentului care-și schimbă sensul de mai multe ori pe secundă, cum este curentul folosit pe rețelele celor mai multe orașe.

Problemă rezolvată. Rezistorul de rezistență R_1, conectat la rețeaua orașului, degajă în 15 min o cantitate Q de căldură; în aceleași condiții, un alt rezistor de rezistență R_2 degajă cantitatea de căldură Q în 30 min. Se cer:

a. Timpul în care cei doi rezistori legați în serie și conectați la rețea vor degaja împreună aceeași cantitate de căldură Q;

b. Timpul în care cei doi rezistori legați în paralel și conectați la rețea vor degaja împreună aceeași cantitate de căldură Q;

c. Rezistorul de rezistență R_1 fiind confecționat dintr-un fir cu diametrul de $3 \cdot 10^{-2}$ cm, rezistivitatea 0,03 $\Omega \frac{mm^2}{m}$, densitatea de 2 700 $\frac{kg}{m^3}$, căldura specifică 920,7 $\frac{J}{kg \cdot grd}$ și temperatura de topire 658°C, se întreabă: va suporta acest fir un curent de 2 A timp de 1 min, fără a se topi? Se va considera $\pi^2 \approx 10$ și temperatura inițială 20°C. (Olimpiada de Fizică, etapa regională, 1964.)

Rezolvare. a) Notînd cu U tensiunea rețelei, cu t_1 și t_2 timpul în care R_1, respectiv R_2 dezvoltă cantitatea de căldură Q, se scrie:

$$Q = \frac{U^2 t_1}{R_1} = \frac{U^2 t_2}{R_2} \Rightarrow \frac{t_2}{t_1} = \frac{R_2}{R_1} = 2 \Rightarrow R_2 = 2R_1.$$

Notînd cu t_3 timpul în care cele două rezistențe legate în serie vor dezvolta cantitatea de căldură Q, se va scrie:

$$Q = \frac{U^2 t_1}{R_1} = \frac{U^2 t_3}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{t_1}{R_1} = \frac{t_3}{R_1 + R_2} \Rightarrow t_3 = 3t_1$$

$t_3 = 3 \cdot 15 = 45$ minute.

Scanned with OKEN Scanner

b) Notînd cu t_4 timpul în care cele două rezistențe R_1 și R_2, legate în paralel, dezvoltă cantitatea de căldură Q:

$$Q = \frac{U^2 t_1}{R_1} = \frac{U^2 t_4}{R_1} + \frac{U^2 t_4}{R_2} \Rightarrow \frac{t_1}{R_1} = \frac{t_4}{R_1} + \frac{t_4}{2R_1} = \frac{3t_4}{2R_1}$$

$$t_4 = \frac{2}{3} t_1 = \frac{2 \cdot 15}{3} = 10 \text{ minute.}$$

c) $mc\Delta\theta = R_1 I^2 t$

$$\Delta\theta = \frac{R_1 I^2 t}{mc} = \frac{\rho \frac{4l}{\pi D^2} I^2 t}{\pi \frac{D^2}{4} ldc},$$

în care: D este diametrul firului, ρ = rezistivitatea, d = densitatea, l = lungimea firului, c = căldura specifică.
Deci:

$$\Delta\theta = \frac{16 \cdot \rho \cdot I^2 \cdot t}{\pi^2 D^4 dc},$$

$$\Delta\theta = 574°C.$$

$\theta_0 + \Delta\theta = 20 + 574 = 594 < 658$: nu se topește, deci suportă încălzirea.

Întrebări, exerciții, probleme

1. În ce constă și cum se explică electronic efectul electrocaloric (Joule)?
2. Să se facă schema unui instrument termic de măsurat tensiunea.
3. Ce rol are și cum funcționează o siguranță fuzibilă?
4. La rețeaua de 220 V se leagă în paralel un reșou de 500 W și o pernă de încălzit de 60 W. Care este intensitatea ce circulă prin conducta principală? Ce rezistență au reșoul și perna?

   Răspuns: 2,55 A; 96,8 Ω; 806 Ω.

5. Cît costă funcționarea timp de 10 ore a unui fier de călcat care are valorile nominale 110 V, 600 W, dacă 1 kWh costă 30 de bani? Ce intensitate are curentul electric care circulă prin el?

   Răspuns: 1,80 lei; 5,45 A.

6. Un electromotor conectat la o rețea cu tensiunea de 220 V consumă un curent de 8A. Dacă randamentul electromotorului este de 85%, care sînt puterea utilă și puterea totală a electromotorului?

   Răspuns: 1,49 kW; 1,76 kW.

7. Pentru confecționarea rezistenței unei plite electrice cu o putere de 600 W, care să funcționeze la 120 V, se folosește sîrmă de crom-nichel cu diametrul de 0,75 mm. Ce lungime trebuie să aibă sîrma?

   Răspuns: ≈ 9,6 m.

8. Ce rezistență are un aparat electric, dacă voltmetrul conectat la bornele lui indică 120 V, iar contorul a înregistrat în 30 minute un consum de energie de 0,3 kWh?

   Răspuns: 24 Ω.

Scanned with OKEN Scanner

9. Pentru răcirea unui reostat curge în jurul lui un curent de ulei, care se încălzește cu 50°. Ce volum de ulei curge pe secundă, știind că reostatul consumă 10 kW, iar uleiul are densitatea de 900 kg/m³ și căldura specifică 1 674 $\frac{J}{kg \cdot grd}$?

Răspuns: $133 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$.

10. Ce randament are un fierbător în care se încălzește un litru de apă de la 18,2°C la 80°C în 10 minute, dacă circulă prin el 2,5 A, cînd este conectat la 220 V?

Răspuns: 78,37%.

11. Un bec de 110 V și puterea de 100 W este alimentat la 220 V. Se cer:
a. Rezistența ce trebuie pusă în serie cu becul, ca acesta să lumineze normal.
b. Se intercalează în circuit un miliampermetru cu o rezistență interioară de 0,9 Ω care are 100 diviziuni pe scală și măsoară 1 mA/1 div, ce valoare trebuie să aibă șuntul său, ca să poată măsura 1 A?
(Concurs de admitere la Facultatea de fizică, 1965, București)

Răspuns: 121 Ω; 0,1 Ω.

12. Un generator produce într-un timp dat o cantitate de căldură într-o rezistență de 9 Ω. Ce rezistență interioară are generatorul dacă produce aceeași cantitate de căldură în același timp, într-o rezistență de 16 Ω?
(Concurs de admitere la Institutul de construcții, București, 1963.)

Răspuns: 12 Ω.

13. Un lichid cu densitatea 1,05 $\frac{g}{cm^3}$ este pompat printr-o conductă verticală de 3 m înălțime, avînd secțiunea circulară, cu diametrul de 40 cm. Pompa este acționată de un electromotor, alimentat la 220 V. Randamentul întregii instalații este de 70%, iar debitul masic al pompei de 120 kg/s. Se cer:
a. Debitul volumic al pompei.
b. Puterea absorbită de instalație de la rețea.
c. Intensitatea în electromotor.
d. Viteza lichidului în conductă.
(Concurs de admitere la Institutul politehnic, București, 1962.)

Răspuns: 0,111 m³/s 5,04 kW; 23 A; 0,9 m/s.

14. De la o uzină electrică pleacă o linie formată din două conductoare de cupru, cu secțiunea de 6 mm². Linia este lungă de 1 km, iar la capătul ei este legat un electromotor prin care circulă un curent de 2 A. Tensiunea de la bornele generatorului uzinei este de 220 V. Ce cădere are tensiunea pe linie, ce tensiune ajunge la bornele electromotorului și ce randament are linia de transport?

Răspuns: 11,68 V; 208,32 V; 94,6%

F. Curentul electric în electroliți. Electroliza și legile ei

2.34. **Curentul electric prin lichide.** Curentul electric poate circula nu numai prin conductoare metalice, dar și prin lichide. Curentul electric trece prin metale datorită mișcării electronilor liberi, care sînt puși în mișcare prin aplicarea unei

tensiuni electrice între capetele conductorului. Trecerea curentului nu produce nici o schimbare a caracterului metalului, din punct de vedere chimic. Conductibilitatea metalelor se numește conductibilitate electronică, pentru că transportul de electricitate constă în mișcarea electronilor. Metalele se numesc *conductoare de clasa I*, iar curentul electric prin metale se numește curent electronic.

Curentul electric prin lichide este o mișcare dirijată de purtători de sarcini electrice pozitive și negative. Conductibilitatea lichidelor se numește conductibilitate ionică, pentru că transportul de electricitate se face de către ioni. Lichidele conductoare se numesc *conductoare de clasa a II-a*, iar curentul electric prin lichide se numește curent ionic.

Așadar, curentul electric constă în transportul dirijat de sarcini electrice, care pot fi electroni, ca în metale, ioni, ca în lichide și gaze*.

Experiență. Într-un vas cu apă distilată se introduc două lame metalice conectate la o tensiune electrică (fig. 2.43). În circuit se introduce și un bec *B*. Becul nu luminează, ceea ce dovedește că prin apa distilată nu trece curentul electric. Este de ajuns să dizolvăm în apă o mică cantitate de NaCl, ori de altă sare, sau să turnăm cîteva picături de H_2SO_4, ori de soluție de NaOH, și becul luminează. Astfel, apa devine bună conducătoare de electricitate dacă în ea se dizolvă o sare, un acid sau o bază.

Apa distilată este neutră, și nu conține particule electrice libere care să poată fi puse în mișcare de către o tensiune electrică. Faptul că prin dizolvarea unei sări, a unui acid sau a unei baze se obține o soluție conductoare dovedește că în soluție există particule încărcate electric, care pot conduce curentul; aceștia sînt ionii.

Substanțele care în stare lichidă conduc curentul electric se numesc *electroliți*.

2.35. Electroliza**. Într-un vas care conține soluția unui electrolit, de exemplu, soluție de $CuCl_2$ (fig. 2.44), se introduc două plăci metalice *A* și *C*. Dacă aceste plăci

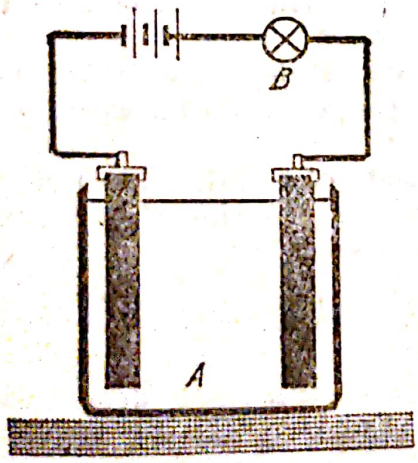


Fig. 2.43

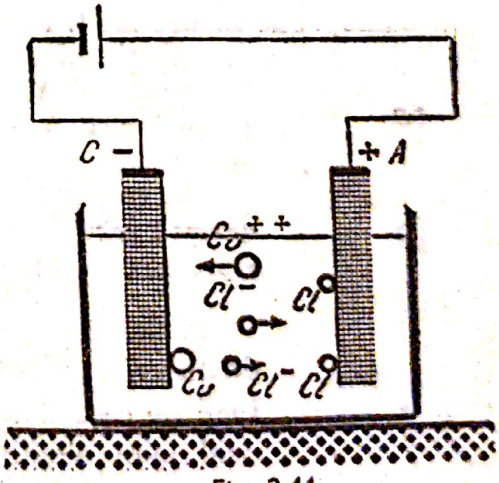


Fig. 2.44

* Studiul curentului electric în gaze se face în capitolul 9.

** Pentru fenomenul de electroliză a se vedea și partea corespunzătoare din manualul de chimie pentru anul I liceu.

Scanned with OKEN Scanner

metalice sînt conectate la o tensiune electrică, în așa fel încît C să fie în legătură cu polul negativ, iar A cu cel pozitiv al generatorului, atunci între cele două plăci se formează un cîmp electric. Plăcile metalice se numesc *electrozi*, și anume, cel negativ se numește *catod*, iar cel pozitiv se numește *anod*. Cîmpul electric produs între anod și catod acționează asupra ionilor din soluție, pe care îi dirijează către electrozi. Cationii sînt atrași de către catod, iar anionii de către anod. În cazul nostru, cationii sînt ionii Cu^{++}, care se deplasează spre catod. Cînd ajung la catod, fiecare din ei primește cîte doi electroni și se neutralizează, devenind atom de Cu, care se depune pe catod. Anionii Cl^- se deplasează înspre anod. Fiecare din ei cedează anodului cîte un electron și se neutralizează, devenind atom de Cl, care formează apoi molecule de Cl_2 și se dizolvă în apă. Fenomenul continuă în același fel, pînă ce se consumă tot electrolitul.

Catodul primește electroni de la polul negativ al generatorului și-i cedează cationilor din soluție. Pe de altă parte, anionii transportă electroni pe care-i cedează anodului, de unde aceștia merg prin conductoare la polul pozitiv al generatorului. Cu alte cuvinte, circuitul electric al generatorului se închide prin electrolit, iar curentul electric circulă prin cuva electrolitică, sarcinile electrice fiind purtate de către ioni. Deci, prin lichide curentul electric circulă prin conductibilitate ionică, așa cum s-a mai spus.

Se numește electroliză dirijarea ionilor către electrozi și transformarea lor în atomi sau radicali, prin neutralizare.

Faptul că în electroliză se produce o deplasare dirijată a ionilor se poate dovedi experimental și cu ajutorul ionilor colorați.

Într-un tub în formă de U se pune o soluție diluată de permanganat de potasiu ($KMnO_4$) care are culoarea violetă și în care s-a introdus soluție de 5% uree, spre a o face mai densă (fig. 2.45). Deasupra se adaugă încet, în fiecare ramură, soluție diluată incoloră, de azotat de potasiu (KNO_3), în care se cufundă electrozii.

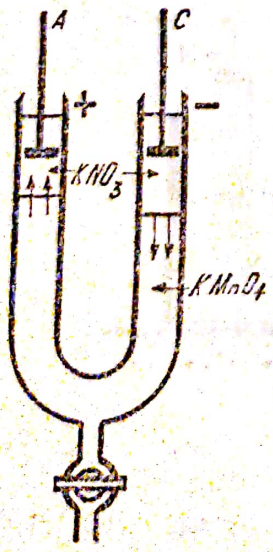


Fig. 2.45

Dacă soluția de KNO_3 este turnată încet, cu grijă, atunci se poate forma o suprafață de separare, distinctă, între cele două soluții.

În timpul electrolizei se constată că anionii colorați MnO se îndreaptă spre anod, ceea ce se observă prin faptul că suprafața de separare coboară la catod și urcă la anod.

2.36. **Legea electrolizei.** Michael Faraday (1791—1867) a descoperit (1834) legile acestui fenomen. El a stabilit factorii de care depinde cantitatea de substanță depusă la electrod prin electroliză. Este evident că această cantitate de substanță depusă la electrozi va depinde, în primul rînd, de curentul electric care produce electroliza și apoi de natura electrolitului.

a. *Influența curentului electric.* Se poate demonstra prima lege a electrolizei cu ajutorul unei experiențe.

Într-un electrolizor (fig. 2.46) se pune o soluție electrolitică, de exemplu, soluție de azotat de argint ($AgNO_3$). Se cîntărește catodul și se lasă apoi să circule curentul electric. După un interval de timp t se întrerupe circuitul, după ce s-a citit intensitatea I a curentului electric la ampermetru. Prin cîntărirea din nou a catodului se constată că masa lui a crescut cu o cantitate m, care reprezintă masa de argint depusă la catod prin electroliză. Dacă se repetă experiența lăsînd să treacă curentul în același interval de timp, dar cu o intensitate dublă de curent, se constată că la catod se depune o masă dublă de metal. Prin urmare, masa de metal depusă la catod este proporțională cu intensitatea curentului:

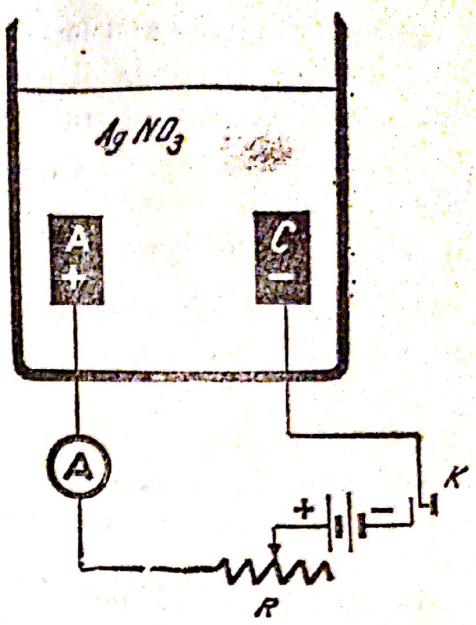


Fig. 2.46

$$m \sim I.$$

Se repetă experiența menținînd aceeași intensitate a curentului electric, dar lăsînd curentul să circule în intervale de timp diferite: t, $2t$, $3t$, ... Se constată că la catod se depun mase de metal proporționale cu timpul:

$$m \sim t.$$

Din aceste experiențe se poate deduce că: *masa de substanță depusă la unul dintre electrozi este proporțională cu intensitatea curentului electric și cu timpul cît circulă curentul electric prin electrolit.*

Această lege se poate exprima cantitativ în forma următoare:

$$m = kIt, \tag{1}$$

unde k este un factor de proporționalitate. Deoarece produsul $It = q$ reprezintă cantitatea de electricitate q transportată de ioni în timpul electrolizei, legea se mai poate scrie:

$$\boxed{m = kq.} \tag{1'}$$

Factorul de proporționalitate k este o mărime care depinde de natura substanței depuse prin electroliză la catod.

Dacă prin electrolizor trece curentul electric de 1 A în timp de o secundă, scoțînd pe k din relația (1), obținem:

$$k = \frac{m}{It} = m \text{ exprimată în } \frac{\text{g}}{\text{A}\cdot\text{s}} \text{ sau } \frac{\text{g}}{\text{C}}.$$

Factorul k reprezintă masa de substanță depusă electrolitic de către un curent de un amper care circulă timp de o secundă, adică masa depusă prin trecerea unui coulomb prin electrolit. El se numește *echivalent electrochimic* al substanței respective. Echiva-

lenții electrochimici ai diferitelor elemente sînt determinați experimental și se găsesc în tabele de constante fizice.

b. *Influența electrolitului.* Însemnînd cu n valența elementului și cu A masa lui atomică, raportul $\frac{A}{n}$ este numeric egal cu echivalentul chimic. Masa în grame dintr-un element egală cu $\frac{A}{n}$ se numește *echivalent-gram.*

Se constată că: *echivalenții electrochimici k ai elementelor sînt proporționali cu echivalenții lor chimici:*

$$\boxed{k = C\frac{A}{n}.} \tag{2}$$

Relațiile (1) și (2) pot fi înglobate într-o singură expresie matematică arătînd că masa de substanță depusă este proporțională cu echivalentul chimic, cu intensitatea curentului și cu timpul:

$$\boxed{m = C\frac{A}{n}.It.} \tag{3}$$

În locul constantei de proporționalitate C se utilizează inversul lui, $C = \frac{1}{F}$. Cu această notație, relația precedentă se scrie:

$$\boxed{m = \frac{1}{F}\cdot\frac{A}{n}It,} \tag{3'}$$

unde F se numește *constanta lui Faraday.* Relația (3') exprimă legea electrolizei.

În tabela următoare sînt dați echivalenții chimici și electrochimici ai cîtorva substanțe.

Substanța	A	n	Echivalent chimic $\frac{A}{n}$	Echivalent electrochimic k, în $\frac{mg}{C}$
Hidrogen	1,008	1	1,008	0,010363
Argint	107,9	1	107,9	1,118
Clor	35,46	1	35,46	0,367
Oxigen	16	2	8	0,0829
Cupru	63,3	2	31,65	0,320
Nichel	58,69	2	29,345	0,3041
Aluminiu	26,97	3	8,99	0,094

2,37. **Constanta lui Faraday.** Semnificația fizică a constantei lui Faraday poate fi dedusă din (3′):

$$q = It = \frac{mnF}{A}\ ;\quad \text{dacă } m = \frac{A}{n} \text{ atunci } q = F.$$

Deci constanta lui Faraday (F) este numeric egală cu cantitatea de electricitate care depune electrolitic un echivalent gram din orice element chimic.

Determinările experimentale au dat pentru constanta lui Faraday valoarea:

$$F \approx 96\,500 \frac{\text{coulombi}}{\text{echivalent}}.$$

138. **Structura corpusculară a electricității. Electronul.** Din legea electrolizei s-a putut deduce că sarcina electrică are structură corpusculară, adică orice sarcină electrică este formată din particule indivizibile de electricitate. Particula indivizibilă de electricitate negativă a primit mai tîrziu (1890) numele de *electron*. Iată una din căile prin care s-a ajuns la măsurarea sarcinii electrice a electronului pe baza legii lui Faraday.

Se constată din formula (3′) că:

1 atom-gram de orice ioni monovalenți transportă F coulombi;

1 atom-gram de orice ioni bivalenți transportă $2F$ coulombi;

1 atom-gram de orice ioni trivalenți transportă $3F$ coulombi.

Dar din legea lui Avogadro se știe că un atom-gram din orice element conține totdeauna același număr $N = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ de particule. Prin urmare, un atom-gram dintr-un element monovalent conține N ioni monovalenți, iar sarcina unui singur ion monovalent va fi:

$$q_1 = e = \frac{F}{N} = \frac{96\,500}{6{,}023 \cdot 10^{23}}$$

adică:

$$\boxed{e \approx 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ coulombi.}}$$

În mod asemănător se deduce că sarcina unui ion bivalent va fi:

$$q_2 = \frac{2F}{N} = 2e,$$

iar a unui ion, care are valența n, va fi de n ori mai mare decît sarcina e a unui ion monovalent:

$$q_n = \frac{nF}{N} = ne.$$

Prin urmare, ionii pot avea numai sarcini egale cu $e, 2e, \ldots, ne$, adică multipli întregi de e. Nici un ion nu poate avea o sarcină care să fie un multiplu fracționar al sarcinii e a ionului monovalent. *Sarcina oricărui ion este un multiplu întreg al sarcinii elementare* e, care reprezintă cea mai mică sarcină de electricitate cunoscută.

Scanned with OKEN Scanner

Aşadar, structura corpusculară a electricităţii se reflectă în faptul că legea a doua a electrolizei este o lege de numere întregi a sarcinii electrice. Dar, ori de cîte ori o mărime fizică variază prin multipli de numere întregi, înseamnă că acea mărime fizică este alcătuită din particule indivizibile. De aceea, Helmholtz (1881) a ajuns la concluzia că „dacă admitem existenţa atomilor, nu putem să evităm consecinţa care decurge de aici, şi anume, că şi electricitatea, atît cea pozitivă cît şi cea negativă, este împărţită în anumite cantităţi elementare, care se comportă ca atomi de electricitate".

Valoarea exactă a sarcinii electronului, dată mai sus, a fost determinată prin altă metodă de R.A. Millikan (1868—1953), în 1913.

G. Aplicaţiile electrolizei

2.39. **Galvanotehnica.** Aplicaţiile tehnice ale electrolizei sînt variate şi foarte importante pentru economia unei ţări.

Electrochimia aplicată are două ramuri importante: *galvanotehnica* şi *electrometalurgia.*

Principalele operaţii galvanotehnice sînt: *galvanostegia* şi *galvanoplastia.*

Galvanostegia este acoperirea metalelor care se oxidează uşor cu un strat subţire din alt metal mai rezistent. De exemplu: nichelarea, cromarea, argintarea etc. Obiectul care se acoperă serveşte drept catod, iar soluţia electrolitică conţine ioni ai metalului care se depun pe catod. Ca anod se foloseşte, de obicei, o placă din acelaşi metal ca cel din soluţie. În acest caz, anodul e solubil, adică se face o electroliză cu anod solubil.

Galvanoplastia este un proces de electroliză similar galvanostegiei, prin care se reproduce pe cale electrolitică un obiect de metal. Depozitul de metal obţinut la galvanoplastie este gros şi se desprinde uşor de tipar; nu este subţire şi aderent ca la galvanostegie.

Pentru a reproduce obiectul în metal, se face mai întîi copia sau tiparul lui în ceară, gutapercă, ghips. Se acoperă apoi tiparul cu grafit, pentru a-l face bun conducător de electricitate. Tiparul se aşază în baia electrolitică, la catod, iar ca anod se pune o placă din metalul din care se reproduce obiectul. La sfîrşit, desprinderea obiectului de pe tipar se face topind ceara. Soluţia conţine ionii metalului care se depun.

2.40. **Electrometalurgia.** Depunerea metalelor la catod prin electroliză formează una din aplicaţiile cele mai însemnate ale electrochimiei. Încă din anul 1807, Davy a separat prin electroliză Na şi K. După aceea, industria electrochimică se dezvoltă din ce în ce mai mult, cuprinzînd ramuri numeroase şi variate: rafinarea metalelor, extragerea metalelor din minereuri, obţinerea aliajelor metalice, prepararea clorului, a hidrogenului şi a oxigenului, obţinerea sărurilor anorganice şi a oxidanţilor etc.

Scanned with OKEN Scanner

Deoarece prin electroliză, alături de produsele principale, se obţin şi produse secundare preţioase şi deoarece prin metode electrochimice se pot prelucra chiar minereuri sărace în metal, această industrie are o mare însemnătate în economia patriei noastre şi este într-o continuă dezvoltare. Documentele de partid şi de stat prevăd extinderea proceselor de electrochimie şi a electrometalurgiei. Acest lucru este posibil datorită creşterii însemnate a producţiei de energie electrică.

Rafinarea cuprului. Anodul este format din lame de cupru nerafinat, care conţine impurităţi (fier, siliciu etc.). Drept catod se folosesc table subţiri de cupru pur. Soluţia este de sulfat de cupru. Pe măsură ce trece curentul, cuprul din soluţia de $CuSO_4$ se depune pe catod, iar cuprul de la anod trece în soluţie. Cuprul electrolitic astfel obţinut este pur şi se foloseşte în industria electrotehnică. Rafinarea cuprului este absolut necesară, deoarece mici impurităţi schimbă mult proprietăţile metalului, de exemplu, numai urme de arsen modifică considerabil conductibilitatea cuprului.

În ţara noastră se prepară cupru electrolitic la Combinatul chimico-metalurgic „Gheorghe Gheorghiu-Dej" de la Baia-Mare (fotografia 1, planşa 1 de la sfîrşitul manualului).

Prepararea aluminiului. Aluminiul prezintă o importanţă deosebită, deoarece este metalul de bază în industria aviaţiei şi este folosit şi în electrotehnică. El se obţine prin electroliza oxidului de aluminiu dizolvat la cald într-o masă topită de minereu, numit criolit. Topitura se realizează într-un cuptor. Cuptorul este format dintr-o cadă de oţel căptuşită pe dinăuntru cu grafit sau cu plăci de cărbune presat, care formează catodul. Anodul este format din plăci mari de cărbune. Cada se umple cu amestec de oxid de aluminiu şi criolit. Cînd trece curentul, criolitul se topeşte şi dizolvă apoi oxidul de aluminiu care suferă electroliza. Ionii Al^{+++} merg la catod, unde se neutralizează, şi aluminiul topit se depune pe fundul cuptorului, de unde se evacuează periodic. Acest mod de preparare este utilizat la Combinatul de aluminiu de la Slatina.

Tot pe cale electrolitică, în afară de aluminiu, se extrag şi următoarele metale: platina, argintul, zincul, cuprul. Rafinarea electrolitică se foloseşte la plumb, fier, staniu, argint, aur. Prepararea prin electroliză a sodiului, a magneziului, a calciului, precum şi prepararea clorului, a hidrogenului şi a oxigenului, a cloraţilor, a sodei caustice sînt cunoscute din studiul chimiei.

Întrebări, exerciţii, probleme

1. În ce constă fenomenul de electroliză?
2. Care este legea electrolizei?
3. Ce reprezintă constanta lui Faraday?
4. Să se arate cum se deduce structura corpusculară a sarcinii electrice din legile electrolizei.
5. Printr-o soluţie de $AgNO_3$, trece un curent electric, timp de o oră. Cantitatea de electricitate transportată este de 3 600 C. Ce intensitate are curentul electric şi cît argint se depune la catod?

Răspuns: 1 A; 4,025 g.

Scanned with OKEN Scanner

6. Cuprul pur utilizat în electrotehnică se obține prin electroliza unor soluții de $CuSO_4$. Ce intensitate de curent este necesară unei instalații industriale cu o producție de o tonă de cupru pe zi?

Răspuns: 36,2 kA.

7. Să se determine raportul dintre sarcina și masa ionului de H, pe baza legilor electrolizei.

Răspuns: $\frac{e}{m_H} \approx 9{,}58 \cdot 10^7 \frac{C}{kg}$.

8. Ce intensitate de curent este necesară pentru a produce prin electroliza apei 0,1 m^3 de H_2 în timp de 20 ore, la presiunea de 101 $\frac{kN}{m^2}$ și la temperatura de 0°C?

Răspuns: 12 A.

9. Trecînd prin apă acidulată, un curent electric produce 150 cm^3 de gaz detonant ($H_2 + O_2$) în timp de trei minute. La sfîrșitul experienței, nivelul apei din voltametru a coborît cu 12 cm față de nivelul din exterior. În timpul experienței, presiunea atmosferică a fost de 750 torr, temperatura a rămas constantă la 20°C, iar densitatea apei acidulate este de 1,13 g/cm^3. Să se afle intensitatea curentului electric.

Răspuns: 4,3 A.

10. Un corp cu suprafața de 100 cm^2 este pus într-o baie de nichel prin care circulă un curent de 1 A. După cît timp se va depune un strat de nichel gros de 0,03 cm? ($\rho_{Ni} = 8{,}8\ g/cm^3$).

Răspuns: ≈ 24 h 7 min.

11. O baie de galvanizare cu sulfat de cupru este legată în serie cu un ampermetru. În baie s-au depus 315 mg de cupru în 10 minute, în care timp ampermetrul a arătat 1,5 A. Să se cerceteze dacă indicația ampermetrului este precisă; în caz contrar, ce corecție este necesară?

Răspuns: corecția + 0,1 A.

Scanned with OKEN Scanner

3. Electromagnetism

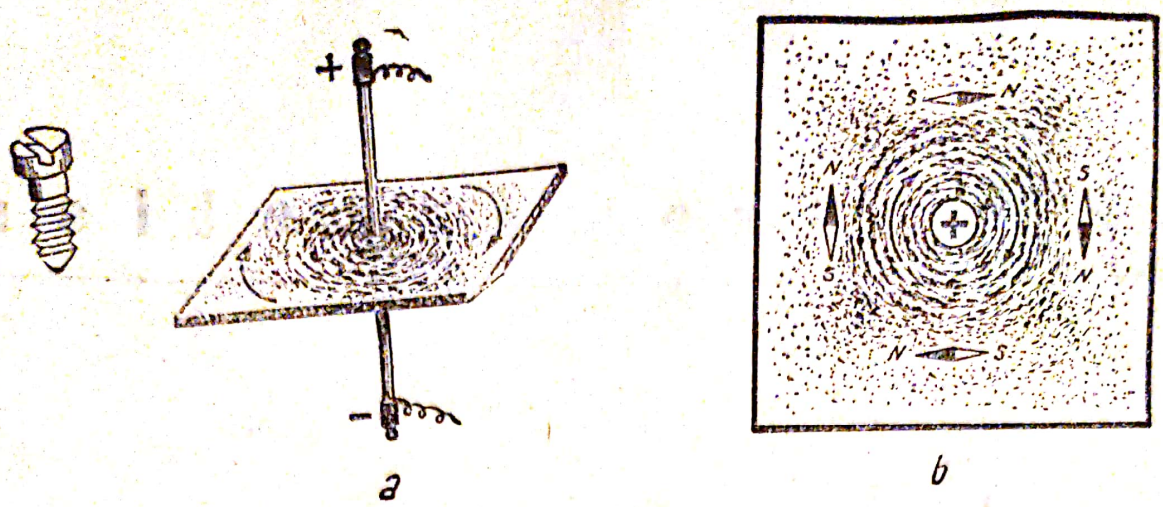
K. Cîmpul magnetic constant și acțiuni ale lui

3.1. **Cîmpul magnetic și structura lui.** Experiența lui Hans Christian Örsted (1777—1851), efectuată în 1820, a arătat că în jurul oricărui conductor parcurs de curent electric apare un *cîmp magnetic*. Fizicianul român Nicolae Vasilescu-Karpen (1870—1964) a demonstrat experimental (1904) că și corpurile macroscopice electrizate, aflate în mișcare, generează cîmp magnetic în jurul lor. Existența acestui cîmp se dovedește prin forța cu care acționează asupra unui ac magnetic, pe care-l orientează, sau prin forța cu care acționează asupra unui conductor mobil, parcurs de curent electric. Cîmpul magnetic posedă energie și exercită acțiuni, este deci un sistem fizic. *Cîmpul magnetic este o formă fizică a materiei, care se manifestă prin forțe aplicate unui ac magnetic sau conductoarelor parcurse de curent electric.* Studiul proprietăților magnetice ale curentului electric se numește *electromagnetism*.

Nicolae Vasilescu-Karpen (1870—1964). Fizician român. A dovedit producerea cîmpului magnetic de către corpurile electrizate în mișcare (1904). A expus fenomenele electromagnetice (1905) fără a mai folosi noțiunea de masă magnetică. A propus cel dintîi folosirea curenților de înaltă frecvență la telefonia la mare distanță. A emis ipoteza existenței electronilor liberi în lichide.

În clasa a VIII-a s-au studiat proprietățile generale ale cîmpului magnetic, pe care le reamintim.

Orientarea acelor magnetice în cîmpul magnetic se face de-a lungul unor linii, care pot fi făcute vizibile cu ajutorul piliturii de fier. Aceste linii, de-a lungul cărora se așază pilitura de fier, se numesc *linii de cîmp magnetic*. Figura formată de liniile



a b

Fig. 3.1

de cîmp magnetic se numește *spectru magnetic*. Liniile de cîmp magnetic sînt curbe închise în jurul curentului care le-a generat. Forma liniilor de cîmp arată *structura cîmpului magnetic*. Pentru un curent liniar ele sînt cercuri concentrice (fig. 3.1, *a*). Cîmpul magnetic care are *liniile de forță paralele și echidistante* (fig. 3.2) se numește *cîmp uniform*. Cu ajutorul unor mici ace magnetice se constată că liniile de cîmp sînt tangente în fiecare punct la direcția luată de acul magnetic (fig. 3.1, *b*). Liniile cîmpului magnetic sînt orientate: au nu numai *direcție*, ci și *sens*.

Sensul liniilor de cîmp depinde de sensul curentului generator de cîmp și se determină cu regula burghiului. Se așază un burghiu paralel cu direcția curentului electric (fig. 3.1, *a*): *sensul în care trebuie rotit burghiul pentru a se deplasa în sensul curentului electric este sensul liniilor de cîmp magnetic.* În figura 3.1, *b*, curentul este perpendicular pe fața hîrtiei, avînd sensul dinspre noi înspre fața hîrtiei (notat cu semnul ⊕); în acest caz liniile de cîmp magnetic au sensul orar.

3.2. **Produs vectorial.** Operațiunea numită produs vectorial a doi vectori $\vec{a}$ și $\vec{b}$ are ca rezultat un al treilea vector $\vec{c}$: $\boxed{\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}}$. Vectorul produs vectorial $\vec{c}$ are următoarele elemente (fig. 3.3): *punctul de aplicație* în originea unuia din factori: *direcția* perpendiculară pe planul format de direcțiile vectorilor factori: *sensul* vectorului $\vec{c}$ e dat de regula burghiului. *E sensul în care se deplasează un burghiu* (așezat paralel cu $\vec{c}$) *dacă e rotit în sensul aducerii primului vector peste al doilea, printr-o rotație minimă* (de unghiul $\alpha < \pi$, unde α este unghiul dintre $\vec{a}$ și $\vec{b}$). Mo-

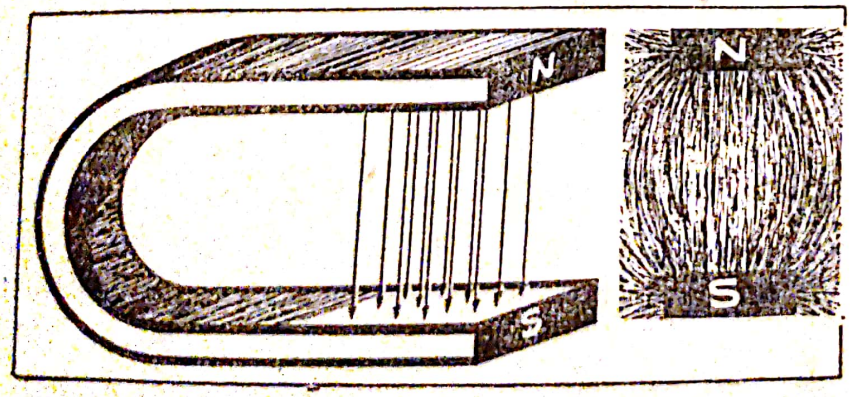


Fig. 3.2

dulul c este dat de următoarea regulă de calcul: $c = ab \cdot \sin \alpha$. Dacă $\alpha = \frac{\pi}{2}$, vectorii sînt perpendiculari, iar produsul lor vectorial este maxim $c = ab \sin \frac{\pi}{2} = ab$.

Dacă $\alpha = 0$, vectorii sînt paraleli, iar produsul lor vectorial este nul $c = ab \sin 0 = 0$.

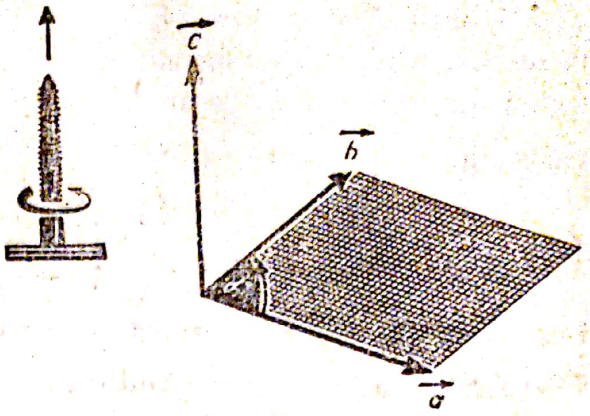


Fig. 3.3

3.3. **Forța electromagnetică.** Acțiunea cîmpului magnetic asupra unui conductor parcurs de curent electric poartă numele de *forță electromagnetică*. Ea rezultă din interacțiunea produsă între cîmpul magnetic exterior și curentul electric din conductor.

Experiență. Se așază pe masă un magnet permanent puternic, în formă de U (fig.3.4), așa fel încît liniile cîmpului magnetic uniform să fie îndreptate în jos. Cu ajutorul a două fire de sîrmă subțire se suspendă orizontal, între polii magnetului, o bară de aluminiu, prin care circulă curent electric I de la A la B. În cîmpul magnetic uniform se află o porțiune $AB = l$ din conductorul de aluminiu, perpendiculară pe liniile cîmpului magnetic uniform. Conductorul este deviat spre exterior cu o forță $\vec{F}$. Inversînd sensul curentului electric, se inversează și sensul forței electromagnetice $\vec{F}$. Întorcînd magnetul cu polul S deasupra, se inversează de asemenea sensul forței electromagnetice. Deci *sensul forței electromagnetice depinde atît de sensul curentului, cît și de sensul liniilor cîmpului magnetic.*

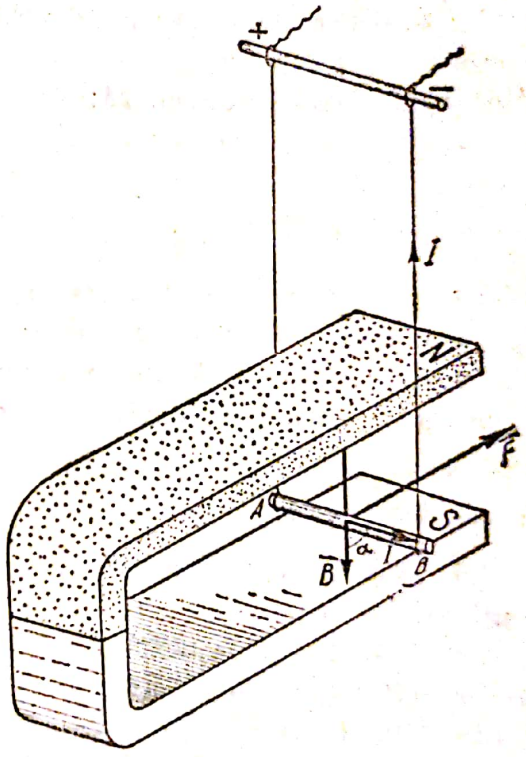


Fig. 3.4

Dacă curentul devine mai intens, forța electromagnetică devine tot de atîtea ori mai mare. Experiențele dovedesc că forța electromagnetică este proporțională cu intensitatea curentului electric I și cu lungimea porțiunii de conductor l aflată în cîmpul magnetic: $F \sim Il$.

Pentru același I și același l, dar alt magnet, forța $\vec{F}$ are altă valoare. Forța electromagnetică este proporțională cu I, l și cu un factor care caracterizează acțiunea cîmpului magnetic. Se poate deci scrie:

$$\boxed{F = BIl.} \qquad (1)$$

Mărimea B este numită *inducție magnetică*. Forța electromagnetică este perpendiculară pe planul format de direcția curentului cu liniile cîmpului magnetic uniform. Considerînd l ca un vector cu sensul lui I și B de asemenea un vector, forța electromagnetică $\vec{F}$ se exprimă prin produsul vectorial:

$$\boxed{\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}).} \qquad (1')$$

Din această relație rezultă conform regulii de calcul a produsului vectorial: $F = IlB \sin \alpha$, α fiind unghiul dintre $\vec{l}$ și $\vec{B}$. Se observă că forța este maximă cînd $\sin \alpha = 1$ sau $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Valoarea maximă a forței electromagnetice se obține deci cînd $\vec{l}$ este perpendicular pe $\vec{B}$. Sensul ei se află ca sensul oricărui vector produs vectorial.

Din (1) se poate deduce că:

$$\boxed{B = \frac{F}{I \cdot l}}, \qquad (1'')$$

relație cu ajutorul căreia se poate defini inducția magnetică $\vec{B}$. Pentru aceasta se face $I = 1$, $l = 1$ și atunci $B = F$, adică: *inducția unui cîmp magnetic uniform este o mărime vectorială numeric egală cu forța cu care cîmpul magnetic acționează asupra unui conductor lung de o unitate, prin care trece un curent de o unitate, cînd e așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic*. Inducția magnetică $\vec{B}$ este un vector tangent la linia de cîmp magnetic.

3.4. Flux de inducție magnetică. Pentru a studia configurația spațială a cîmpului magnetic s-a ales o mărime fizică numită flux magnetic, care face legătura între geometria suprafețelor intersectate de liniile cîmpului magnetic și inducția cîmpului. Suprafața intersectată de liniile cîmpului are fețele deosebite: prin una intră liniile (fața negativă), prin cealaltă ies (fața pozitivă). O astfel de suprafață este orientată, deoarece se poate lega semnul feței de sensul de parcurs al conturului ei prin regula burghiului. Așezat perpendicular pe suprafața S, burghiul se deplasează în sensul pozitiv al normalei $\vec{n}$ (versor — vector unitate) dacă este rotit în sensul de parcurs al conturului suprafeței (fig. 3.5). O suprafață orientată de arie S poate fi reprezentată printr-un vector $\vec{S}$ care are: *originea* într-un punct al suprafeței *orientarea* vectorului unitate normal $\vec{n}$, iar *modulul* egal, în unități liniare, cu valoarea numerică a ariei S, deci $\vec{S} = S\vec{n}$. În aceste condiții fluxul de inducție magnetică

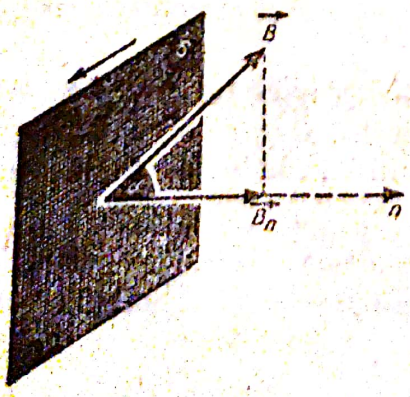


Fig. 3.5

Scanned with OKEN Scanner

(fluxul magnetic) pentru o suprafață S este o mărime Φ egală cu produsul scalar dintre vectorul $\vec{B}$ și vectorul $\vec{S}$

$$\boxed{\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}} \qquad (2)$$

sau $\Phi = B \cdot S \cos \alpha = B_n S$.

Unitatea de flux magnetic în SI va fi definită pe baza unui fenomen ce va fi studiat mai tîrziu. Ea se numește weber (simbol Wb).

Cu ajutorul fluxului de inducție se poate defini inducția magnetică și pe altă cale, pornind de la formula:

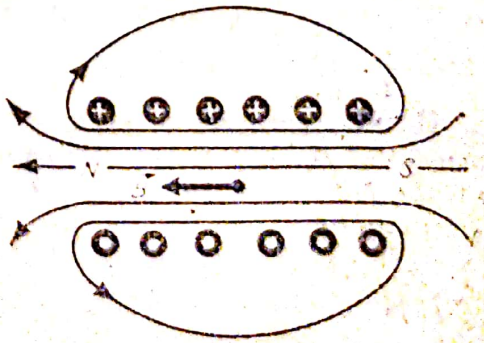
$$B_n = \frac{\Phi}{S}, \qquad (3)$$

în care se face $S = 1$ și atunci $B_n = \Phi$. Așadar, *inducția magnetică a unui cîmp magnetic uniform este o mărime vectorială numeric egală cu fluxul de inducție uniform, produs printr-o unitate de suprafață, așezată perpendicular pe liniile cîmpului.* Cu ajutorul unității de flux magnetic, weberul, se poate defini unitatea de inducție magnetică: $< B >_{SI} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$ care a primit numele de tesla (simbol T). *Tesla este inducția unui cîmp magnetic uniform, care produce un flux de 1 Wb printr-o suprafață de 1 m², așezată perpendicular pe liniile de cîmp.*

3.5. **Inducția magnetică a cîmpului din interiorul unui solenoid parcurs de curent electric.** Prin *solenoid* se înțelege un sistem de curenți circulari, paraleli, de același sens, așezați echidistant cu centrele pe o axă mult mai lungă decît diametrul spirelor. În practică se realizează solenoidul cu un fir de sîrmă izolată, înfășurată elicoidal, sub formă de spire alăturate, pe un cilindru, cu lungime mare față de diametrul spirelor. Solenoidul se mai numește și *bobină*.

Cu ajutorul piliturii de fier se pune în evidență structura cîmpului magnetic al solenoidului (fig. 3.6, *a*). În exterior cîmpul magnetic al solenoidului este la fel cu cel al unei bare magnetice. De altfel și alte proprietăți magnetice ale solenoidului sînt la fel cu ale barei magnetice. În interior, *cîmpul magnetic* este uniform, inducția

a



b

Fig. 3.6

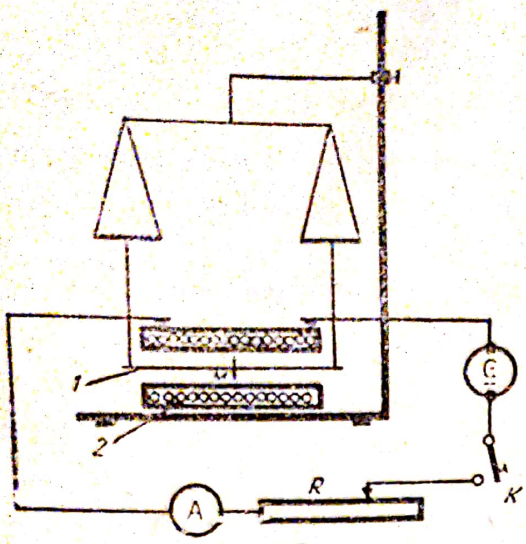


Fig. 3.7.

lui magnetică are aceeaşi valoare în orice punct. Capătul solenoidului prin care ies liniile de cîmp se numeşte *pol nord*, iar cel prin care intră se numeşte *pol sud* al solenoidului (fig. 3.6, *b*). *Sensul liniilor cîmpului magnetic se determină aplicînd regula burghiului drept: este sensul în care se deplasează burghiul, aşezat paralel cu axa solenoidului, cînd este rotit în sensul curentului electric.*

Experienţă. Un ac magnetic *M* de 2—3 cm lungime este înfipt perpendicular pe mijlocul unei baghete din lemn subţire şi foarte uşoară, cam de circa 25 cm lungime (fig. 3.7). Bagheta *1* este suspendată prin două fire de aţă, de platanele unei balanţe echilibrată aşa ca bagheta să fie orizontală. Ea este introdusă printr-o bobină de 250—500 spire *2*, de-a lungul axului ei. Bobina este conectată în circuitul unei surse de circa 10 V, în serie cu un reostat cu cursor *R*, un ampermetru *A* şi un întrerupător *K*. Se închide circuitul şi se reglează intensitatea la o valoare *I* (circa 50 mA). Cîmpul produs în bobină deviază acul magnetic, iar balanţa se dezechilibrează. Se adaugă etaloane de masă pe platanul ridicat pînă ce balanţa este readusă la echilibru. Valoarea greutăţii corpurilor cu masa marcată este o măsură a forţei electromagnetice, deci a lui *B*. Repetînd experienţa pentru curenţi de *2I*, *3I* etc. se constată că valorile lui *B* devin *2B*, *3B* etc. Aşadar: pentru aceeaşi bobină, în aceleaşi condiţii *inducţia magnetică* variază proporţional cu intensitatea curentului care circulă prin spire: $B \sim I$.

Se repetă experienţa, cu acelaşi curent, folosind o bobină la fel de lungă, dar cu număr de spire pe jumătate sau dublu. Se constată că inducţia magnetică variază proporţional cu numărul *N* de spire, pentru acelaşi curent şi aceeaşi lungime a bobinei: $B \sim N$.

Menţinînd acelaşi curent *I* şi acelaşi număr de spire *N* se repetă experienţa cu o bobină de 500 spire, apoi cu două de aceeaşi lungime de cîte 250 spire, legate în serie şi alăturate: lungimea solenoidului se dublează. Se constată că pentru acelaşi *N* şi acelaşi *I*, inducţia magnetică variază invers proporţional cu lungimea bobinei: $B \sim \frac{1}{l}$.

Rezultatele acestor experienţe se pot stringe într-o singură concluzie: *inducţia magnetică într-un punct din interiorul unui solenoid (bobină) este proporţională cu numărul de spire, cu intensitatea curentului şi este invers proporţională cu lungimea solenoidului.*

$$B = \mu \frac{NI}{l}. \qquad (4)$$

Factorul de proporţionalitate μ depinde de natura mediului în care se produce inducţia magnetică.

Scanned with OKEN Scanner

3.6. Permeabilitatea magnetică. Din relația (4) se constată că inducția magnetică B *depinde de* intensitatea curentului și forma circuitului $\left(\frac{NI}{l}\right)$, precum și de **proprietățile magnetice ale mediului** în care se creează cîmpul magnetic. *Proprietățile magnetice ale unui mediu sînt caracterizate de o mărime* μ *numită permeabilitate magnetică a mediului.* Dacă solenoidul este în vid, inducția magnetică va fi: $B_0 = \mu_0 \left(\frac{NI}{l}\right)$, notînd cu μ_0 permeabilitatea magnetică a vidului. Se deduce:

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r.$$

Raportul:

$$\boxed{\frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r} \qquad (5)$$

se numește *permeabilitate relativă* μ_r a mediului: ea reprezintă raportul dintre permeabilitatea mediului și permeabilitatea vidului. Este o *constantă de material*, și evident, nu are unități de măsură.

Permeabilitatea magnetică relativă μ_r a unui material se măsoară prin *raportul dintre modulul inducției magnetice* $\vec{B}$ *produsă într-un solenoid cu miez din acel material și modulul inducției magnetice* $\vec{B}_0$ *produsă în vid, de același solenoid, parcurs de același curent.*

Unitatea de permeabilitate magnetică se poate deduce din (4):

$$\langle \mu \rangle_{SI} = \frac{\langle B \rangle \langle l \rangle}{\langle N \rangle \langle I \rangle} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} \cdot \frac{1}{\text{m}},$$

deoarece N (numărul de spire) nu are unitate de măsură.

Unitatea $\frac{\text{Wb}}{\text{A}}$ a primit numele de henry (simbol H). De aceea unitatea de permeabilitate este:

$$\langle \mu \rangle_{SI} = \frac{\text{H}}{\text{m}}. \qquad (6)$$

3.7. Intensitatea cîmpului magnetic. Inducția magnetică produsă într-un punct de un curent electric depinde de *natura mediului*, reprezentată prin μ, dar și de *forma circuitului* și *intensitatea curentului*, reprezentate prin expresia $\frac{NI}{l}$. Expresia $H = \frac{NI}{l}$ se numește *intensitatea cîmpului magnetic* și poate să caracterizeze, de asemenea, cîmpul magnetic într-un punct, dar independent de mediul în care este generat cîmpul magnetic. Intensitatea cîmpului magnetic $\vec{H}$ este o mărime vectorială ca și $\vec{B}$, din același punct al cîmpului. Acești doi vectori sînt coliniari, de același sens, iar între ei există relația

$$\boxed{\vec{B} = \mu \vec{H},} \qquad (7)$$

Scanned with OKEN Scanner

dedusă din (4). În timp ce B este dedus din forțele exercitate de cîmpul magnetic, H este calculat din valoarea curentului și forma circuitului prin formula de mai sus $H = \frac{NI}{l}$. Intensitatea cîmpului magnetic dintr-un punct din interiorul solenoidului va fi deci: $H = \frac{B}{\mu} = \frac{NI}{l}$.

Unitatea de intensitate a cîmpului magnetic se deduce astfel:

$$\langle H \rangle_{SI} = \frac{\langle N \rangle \langle I \rangle}{l} = \frac{\text{A}}{\text{m}},$$

și se numește *amper pe metru*.

3.8. **Cîmpul magnetic generat în jurul unui conductor liniar parcurs de curent.** Liniile de cîmp sînt cercuri concentrice pe curent. Acul magnetic arată sensul acestor linii (fig. 3.1, *b*), dat de regula burghiului (fig. 3.8, *b*). Experiența a dovedit că intensitatea cîmpului magnetic într-un punct A este dată de relația:

$$\boxed{H = \frac{I}{2\pi r},} \tag{8}$$

numită *legea Biot-Savart*. Inducția magnetică B în același punct va fi:

$$\boxed{B = \frac{\mu I}{2\pi r},}$$

unde r este distanța de la punct la conductorul liniar parcurs de curentul electric (fig. 3.8, *a*).

3.9. **Cîmpul magnetic generat în jurul unui conductor circular parcurs de curent electric.** Pe un carton orizontal, care este străbătut de o spiră în două puncte

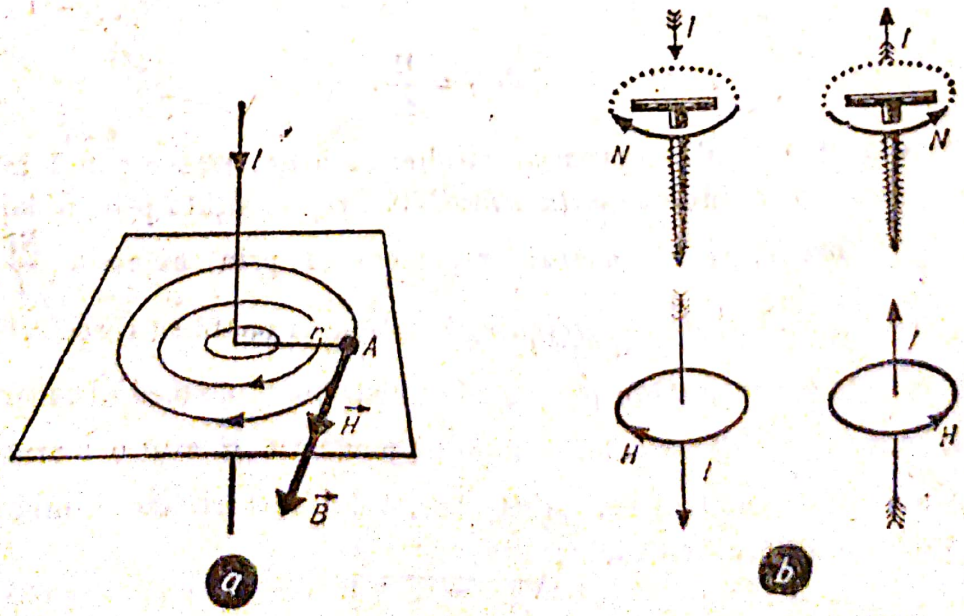


Fig. 3.8

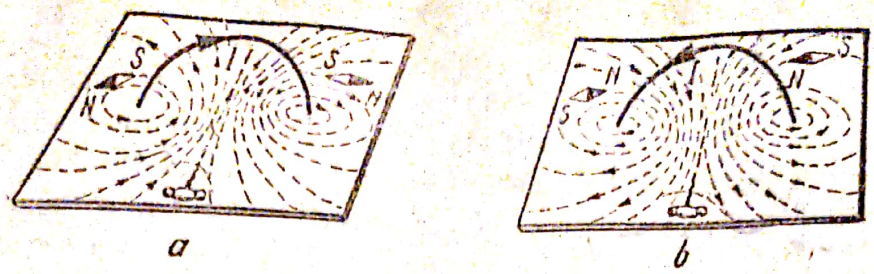


Fig. 3.9

(fig. 3.9), se presară pilitură de fier. Liniile de cîmp ale cîmpului magnetic generat sînt *curbe închise*, care înconjură curentul; la rîndul său, spira înconjură liniile cîmpului. Ele sînt ca două zale ale unui lanț: spunem că sînt *înlănțuite*. Liniile de cîmp ies printr-o față a spirei — fața *nord* — și intră prin cealaltă — fața *sud*. Cu alte cuvinte o spiră parcursă de curent electric este asemenea unui magnet plat, numit *foiță magnetică*. În centrul spirei cîmpul magnetic are intensitatea:

$$\boxed{H = \frac{I}{2r}} \qquad (9)$$

Inducția magnetică va fi orientată în sensul vectorului unitate normal la suprafața spirei parcursă în sensul curentului electric:

$$\boxed{B = \frac{\mu I}{2r}} \qquad (10)$$

cu aceeași orientare ca $\vec{H}$.

Un cadru format din N spire alăturate (fig.3.10) parcurse de curentul I produce în centrul său un cîmp magnetic de N ori mai intens decît în cazul unei singure spire parcurse de același curent. De aceea, cadrul se mai numește *multiplicator*. Pe temeiul formulei (9) se poate defini unitatea de intensitate a cîmpului magnetic:

$$\langle H \rangle_{SI} = \frac{\langle \mathrm{I} \rangle}{\langle \mathrm{r} \rangle} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}.$$

Așadar: *amper pe metru este intensitatea cîmpului magnetic în centrul unei spire cu diametrul de 1 metru, parcursă de un curent 1 A.*

André Marie Ampére (1775—1836). Fizician francez. A descoperit legile interacțiunii dintre curenții electrici. A elaborat prima teorie (1825) pentru explicarea magnetismului, cu ajutorul curenților moleculari. A fost unul dintre fondatorii electrodinamicii moderne.

3.10. Acțiunea reciprocă a două conductoare paralele, parcurse de un curent electric. Orice conductor prin care circulă curent electric se găsește în propriul său cîmp magnetic. Dacă două conductoare parcurse de curent electric se află în vecinătate,

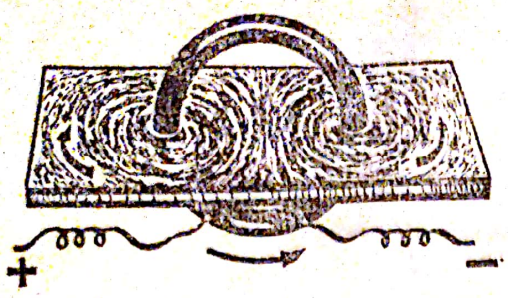


Fig. 3.10

cîmpurile lor magnetice se vor suprapune, se vor compune, și între conductoare se vor exercita forțe electrice de atracție ori de respingere, numite forțe electrodinamice. Aceste forțe au fost studiate de André Marie Ampère.

Experiență. Cadrul C_1, suspendat prin contactele mobile A_1 și A_2 de un stativ (fig. 3.11), este parcurs de curentul I_1, care intră prin borna B_1 și iese prin B_2. Al doilea cadru C_2 este parcurs de curentul I_2. Se așază cadrul C_2 așa ca prin laturile lor paralele și apropiate să circule curentul în același sens: cadrul C_1 se apropie de C_2, deci între laturile paralele parcurse de curenți de același sens se exercită o forță de atracție. Întorcînd cadrul C_2 așa ca prin laturile considerate să circule curenții I_1 și I_2 în sens contrar, forța dintre laturile paralele este de respingere, de aceea cadrul C_1 se depărtează de C_2.

Ampère a dedus legile acțiunilor reciproce dintre conductoarele parcurse de curent electric. *Conductoarele paralele prin care circulă curenți de același sens se atrag. Dacă sînt parcurse de curenți de sens contrar se resping. Dacă cele două conductoare prin care circulă curentul fac între ele un unghi (și sînt mobile) se rotesc pînă ajung paralele așa ca să fie parcurse de curenți în același sens.*

Valoarea forței electrodinamice se poate deduce în modul următor (fig. 3.12). Conductorul parcurs de curentul I_2 se află în cîmpul magnetic produs de I_1, care va avea în punctul A_2 inducția $B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi r}$; r este distanța dintre cele două conductoare. Cîmpul de inducție $\vec{B}_1$ va produce asupra lui I_2 o forță electromagnetică $\vec{F}_1$:

$$F_1 = B_1 I_2 l = \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi r},$$

pentru o porțiune de conductor de lungime l.

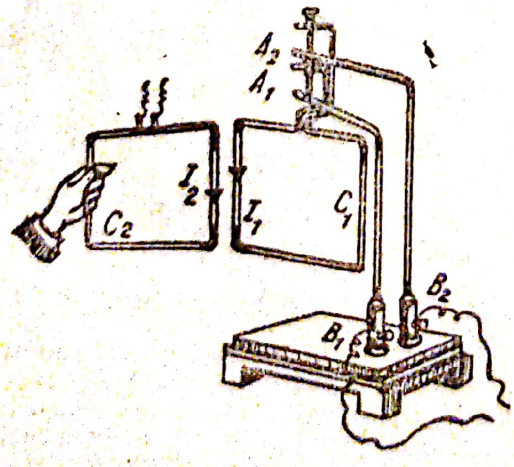


Fig. 3.11

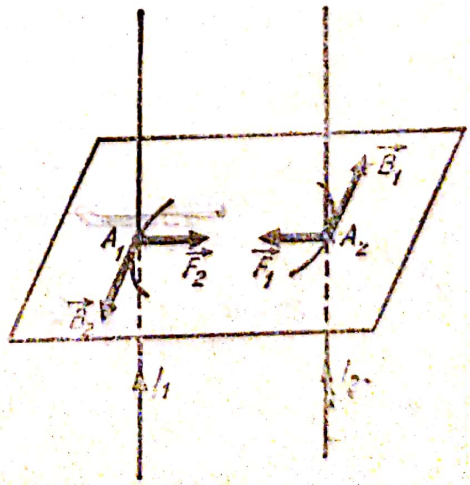


Fig. 3.12

În mod analog, inducția $\vec{B}_2$, produsă de I_2 în punctul A_1, va acționa cu forța electromagnetică $\vec{F}_2$ asupra lui I_1:

$$F_2 = B_2 I_1 \cdot l = \mu \frac{I_1 I_2 \cdot l}{2\pi r} = F_1.$$

Așadar, două conductoare paralele parcurse de curent electric interacționează cu o forță:

$$\boxed{F = \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi r}.} \qquad (11)$$

3.11. Etalonul pentru unitatea de intensitate a curentului electric. Amperul este unitate fundamentală, în SI. Realizarea concretă a acestei unități — etalonul ei — se face pe baza interacțiunii dintre curenții rectilinii și paraleli. Din expresia ei (11) se deduce, făcînd $I_1 = I_2 = I$, relația de definiție pentru intensitate:

$$I = \sqrt{\frac{2\pi r F}{\mu_r \mu_0 l}}.$$

Pe temeiul acestei relații s-a definit amperul astfel:

- Amperul este intensitatea curentului electric constant care, circulînd prin două conductoare rectilinii paralele și foarte lungi, așezate în vid la 1 m unul de altul, produce între aceste conductoare o forță de $2 \cdot 10^{-7}$ newtoni pe un metru de lungime.

Din definirea amperului se poate deduce valoarea constantei magnetice μ_0 astfel:

$$\mu_0 = \frac{2\pi r F}{\mu_r I^2 l} = \frac{2\pi \cdot 1\text{m} \cdot 2 \cdot 10^{-7}\text{N}}{1\text{A}^2 \cdot 1\text{m}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}.$$

Dar din ecuația (1) se deduce:

$$N = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot \text{A} \cdot \text{m},$$

deci

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Wb} \cdot \text{A} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{A}^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A}} \cdot \frac{1}{\text{m}}$$

și, în fine:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}. \qquad (12)$$

3.12. Acțiunea cîmpului magnetic asupra particulelor electrizate aflate în mișcare. Orice particulă electrizată și în mișcare reprezintă un curent electric. Cîmpul magnetic va acționa de aceea asupra ei cu o forță care a primit numele de forță lorentziană, în cinstea fizicianului Hendrik Antoon Lorentz (1853—1928). Expresia acestei forțe se poate deduce pornind de la formula forței electromagnetice (1) care acționează

Scanned with OKEN Scanner

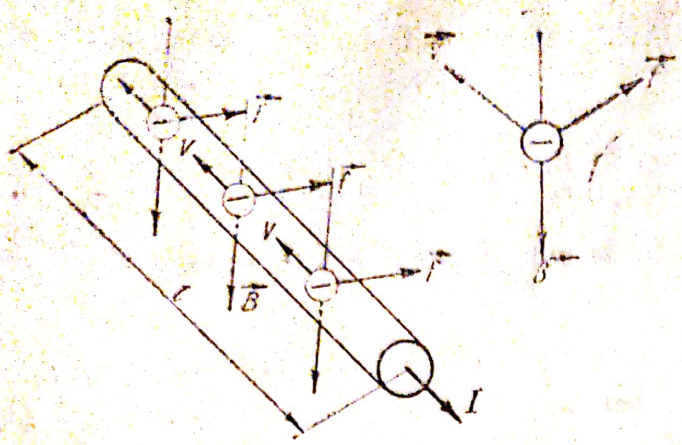


Fig. 3.13

asupra unui conductor de lungime l (fig. 3.13), parcurs de curentul I și aflat în cîmpul $\vec{B}$.

Modulul forței lorentziene $\vec{f}$ va fi:

$$f = \frac{F}{nSl} = \frac{IBl}{nSl} = \frac{IB}{nS},$$

în care n este concentrația electronilor liberi din conductor. În porțiunea de conductor l vor fi nSl electroni. Dar intensitatea curentului este sarcina electronilor care străbat secțiunea conductorului S într-o secundă $I = neSv$, unde v reprezintă viteza medie a electronilor liberi. Așadar:

$$f = \frac{neSvB}{nS} = evB.$$

O particulă încărcată cu sarcina q, mișcîndu-se cu viteza $\vec{v}$ într-un cîmp uniform de inducție $\vec{B}$, viteza $\vec{v}$ fiind perpendiculară pe liniile de cîmp, este acționată de o forță lorentziană $\vec{f}$:

$$\boxed{f = qvB.} \qquad (13)$$

Direcția acestei forțe este perpendiculară pe planul format de direcția vectorului viteză cu direcția vectorului inducție magnetică, iar sensul este al vectorului $\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$. $\left(\text{În fig. 3.14, } a,\ \alpha = \frac{\pi}{2}.\right)$ În cazul cînd viteza $\vec{v}$ face unghiul $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$ cu direcția liniilor de cîmp (fig. 3.14, b) forța lorentziană va fi:

$$f = qv_1B = qvB \sin \alpha,$$

adică va fi tocmai produsul vectorial dintre vectorul $q\vec{v}$ și vectorul inducție magnetică $\vec{B}$:

$$\boxed{\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}.} \qquad (14)$$

Pe figura 3.14, b forța lorentziană $\vec{f}$ este îndreptată de la figură spre noi, adică în sensul în care s-ar deplasa un

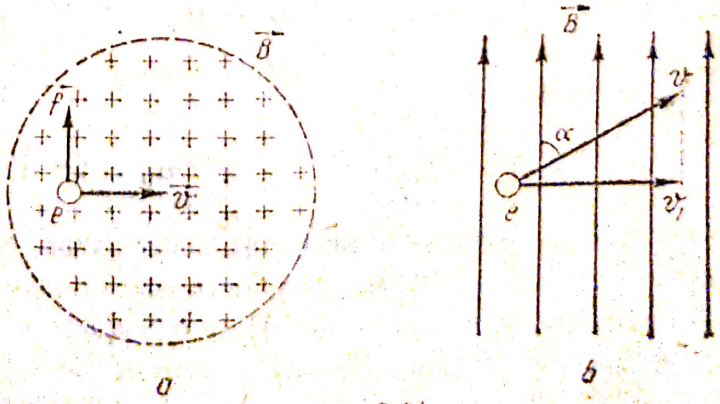


Fig. 3.14

burghiu cînd ar fi rotit în sens antiorar (pentru a aduce vectorul $\vec{v}$ peste vectorul $\vec{B}$ pe calea cea mai scurtă) adică sensul aflat cu regula burghiului este acela dat de regula produsului vectorial.

Aplicații ale forței lorentziene. 1. *Mișcarea unei particule electrizate* (ion, proton, electron etc.) *într-un cîmp magnetic uniform, în care intră cu viteza* $\vec{v}$, *perpendiculară pe direcția liniilor de cîmp* (fig. 3.15). Forța lorentziană $\vec{f}$ este permanent perpendiculară pe viteză și pe inducția magnetică, avînd sensul ca în figura 3.15, *a*, pentru particula încărcată pozitiv și ca în figura 3.15, *b*, pentru particula încărcată negativ. Forța lorentziană acționează ca o forță centripetă și, ca urmare, *particula descrie o traiectorie circulară*, avînd planul perpendicular pe liniile de cîmp: $f = F_{cp} \Rightarrow qvB = \frac{mv^2}{r}$, r fiind raza traiectoriei particulei. De aici se deduce:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{Br}, \tag{15}$$

adică *sarcina specifică* a particulei electrizate. Este de remarcat faptul că în timp ce descrie traiectoria circulară în cîmpul magnetic uniform, cîmpul magnetic nu transmite particulei energie sub formă de lucru mecanic (forța lorentziană este perpendiculară pe viteză, adică pe deplasare); particula se mișcă, păstrînd constantă energia cu care a intrat în cîmp.

Perioada T a particulei în această mișcare circulară va fi:

$$T = \frac{2\pi r}{v},$$

iar v se scoate din relația (15). Se obține astfel:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Valoarea perioadei depinde numai de masa și sarcina particulei și de inducția cîmpului magnetic; nu depinde de raza traiectoriei.

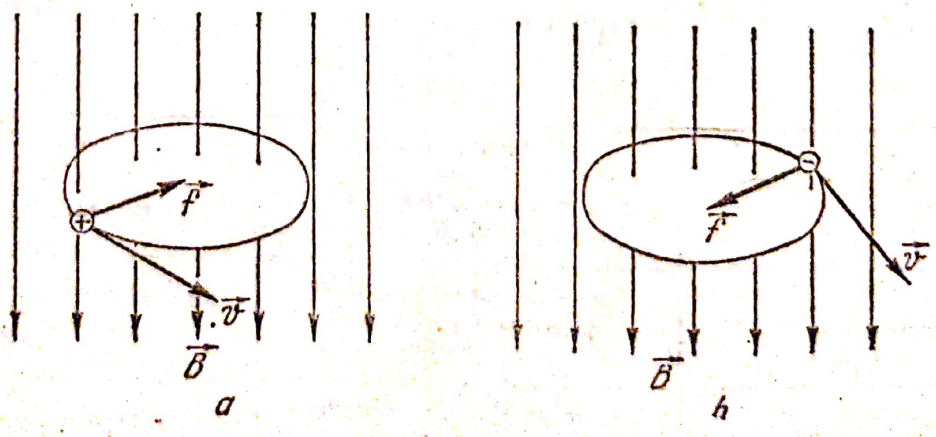


Fig. 3.15

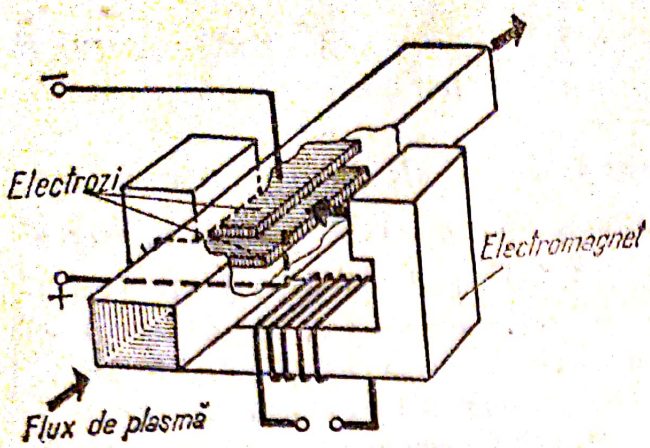


Fig. 3.16

Mișcarea particulelor în cîmpul magnetic are aplicații în fizica atomică (ciclotron, determinarea sarcinii specifice etc.). Pe această cale s-a determinat sarcina specifică a electronului $\left(\frac{e}{m}\right)$, iar din aceasta, cunoscîndu-se sarcina electronului e, s-a determinat masa electronului.

Determinarea sarcinii specifice a electronului pentru viteze din ce în ce mai mari a făcut să se observe că această mărime scade pe măsură ce viteza crește. Întrucît sarcina este invariantă, urmează că masa electronului crește cu viteza. În felul acesta s-a demonstrat experimental variația relativistă a masei cu viteza, potrivit formulei:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (16$$

dovedită de teoria relativității. În relația (16), m_0 este masa de repaus, m este masa electronului care se mișcă cu viteza de modul v, iar $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ este viteza luminii în vid.

2. *Generator magnetohidrodinamic.* Un curent de gaz puternic ionizat (plasma) intră cu mare viteză într-un cîmp magnetic intens (fig. 3.16). Așezați lateral se găsesc doi electrozi uniți prin exterior cu un rezistor. Forța lorentziană acționează asupra purtătorilor de sarcină (ioni și electroni) pe care îi deviază lateral, în sensuri opuse: la un electrod sînt deviați ionii $+$, la celălalt electrod, electronii. Particulele neutre își continuă drumul nedeviat. Prin circuitul exterior se produce curent electric. Pe acest principiu se preconizează a se realiza în viitor generatoarele electrice fără piese mobile, care vor transforma energia jetului ionizat direct în energie electrică.

3.13. **Comparație între cîmpul electrostatic și cîmpul magnetic.** Asemănările și deosebirile dintre aceste două cîmpuri ies mai bine în evidență din următorul tabel comparativ:

	Cîmpul electrostatic	Cîmpul magnetic
Produs de	Prezența sarcinilor electrice în echilibru	Mișcarea sarcinilor electrice
Liniile de cîmp	Încep pe sarcini pozitive și sfîrșesc pe sarcini negative	Sînt *linii închise: nu există mase magnetice*
Cîmp uniform se obține	Între armăturile condensatorului plan	În interiorul solenoidului

	Cîmpul electrostatic	Cîmpul magnetic
Intensitatea	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	Inducţia $\vec{B} = \frac{\vec{F}}{qv}$
Orientarea	$\vec{E}$ tangent la linia de cîmp şi de acelaşi sens	$\vec{B}$ tangent la linia de cîmp şi de acelaşi sens
Acţionează asupra	sarcinilor electrice	curenţilor şi magneţilor
Poziţia forţei faţă de intensitate	$\vec{F}$ şi $\vec{E}$ au aceeaşi orientare	$\vec{F}$ este perpendiculară pe $\vec{B}$ şi pe direcţia conductorului
Lucrul mecanic	nu depinde de drum (cîmp potenţial)	depinde de drum (cîmp solenoidal)
Substanţa în cîmp este caracterizată prin	ε_r	μ_r

Probleme rezolvate. 1) Prin trei vîrfuri ale unui pătrat cu latura de 10 cm trec trei curenţi rectilinii foarte lungi, perpendiculari pe planul figurii. Curentul $I_1 = 251{,}2$ A are sensul dinspre figură spre noi; ceilalţi doi, de acelaşi sens, dar opuşi lui I_1, au valorile $I_2 = 502{,}4$ A şi $I_3 = 251{,}2$ A.

Se cer: *a)* intensitatea cîmpului magnetic produs în al patrulea vîrf, opus lui I_2; *b)* unghiul făcut de direcţia acestei intensităţi cu diagonala pătratului; *c)* forţa electromagnetică ce se exercită asupra unităţii de lungime a unui conductor rectiliniu, paralel cu ceilalţi, parcurs de $I = 200$ A, de acelaşi sens cu I_1 şi care trece prin vîrful al patrulea; ce devine această forţă dacă I_1 şi I_2 îşi schimbă sensul?

Rezolvare. a) se reprezintă curenţii perpendicular pe planul hîrtiei, pentru a scoate în evidenţă poziţia relativă a vectorilor $\vec{H}$ (fig. 3.17). Intensitatea cîmpului $\vec{H}$ produsă în punctul P de cei trei curenţi I_1, I_2, I_3 va fi suma vectorială a celor trei intensităţi, $\vec{H}_1$, $\vec{H}_2$, $\vec{H}_3$, produse de fiecare curent separat:

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3,$$

unde:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi r} = \frac{251{,}2}{2\pi \cdot 0{,}1} = 400\ \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

$$H_3 = \frac{I_3}{2\pi r} = 400\ \frac{\text{A}}{\text{m}};$$

$$H_{13} = \sqrt{H_1^2 + H_3^2} = 400\sqrt{2}\ \frac{\text{A}}{\text{m}};$$

$$H_2 = \frac{I_2}{2\pi r} = \frac{502{,}4}{2\pi \cdot 0{,}1\sqrt{2}} = 400\sqrt{2}\ \frac{\text{A}}{\text{m}};$$

$$H = \sqrt{H_2^2 + H_{13}^2} = 800\ \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Vectorul $\vec{H}$ este îndreptat spre I_1.

b) Se determină α din:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{H_1}{H_3} = \frac{400}{400} = 1 \Rightarrow \alpha = 45°,$$

c) Forța electromagnetică F va fi:

$$\frac{F}{l} = \mu HI = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 800 \cdot 200 = 64\pi \cdot 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}},$$

fiind aplicată în punctul P, cu direcția I_3P, având sensul dinspre I_3 către P.

d) $\vec{H}_3$ rămîne neschimbat; $\vec{H}_1$ și $\vec{H}_2$ își păstrează modulele și direcțiile, dar își schimbă sensurile (fig. 3.17,*b*). În acest caz $\vec{H}_2 = -\vec{H}_{13}$, deci $\vec{H} = 0$, de asemenea $\vec{F} = 0$.

2) Mișcîndu-se în vid, un electron este accelerat între plăcile unui condensator plan aflate la tensiunea de 28 125 V. Electronul iese din cîmpul electrostatic printr-un canal făcut în placa pozitivă a condensatorului și intră într-un cîmp magnetic uniform, cu inducția de 0,014 T, perpendicular pe liniile de cîmp.

Se cer:

a. viteza cu care intră electronul în cîmpul magnetic;

b. raza traiectoriei electronului în cîmpul magnetic;

c. perioada cu care se rotește electronul în cîmpul magnetic;

d. utilizînd valorile lui v și r să se calculeze sarcina specifică a electronului.

Rezolvare. a) Electronul este accelerat de forța $f = eE$, unde E este intensitatea cîmpului $E = \frac{U}{d}$, deci $f = \frac{eU}{d}$, iar accelerația $a = \frac{f}{m} = \frac{eU}{md}$. Se aplică formula lui Galilei pentru distanță (fig. 3.18):

$$v = \sqrt{2ad} = \sqrt{2\frac{eU}{md} \cdot d} = \sqrt{2\frac{eU}{m}}.$$

$$v = \sqrt{2\frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 28\,125}{9 \cdot 10^{-31}}} \approx 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

este viteza cu care electronul va intra în cîmpul magnetic.

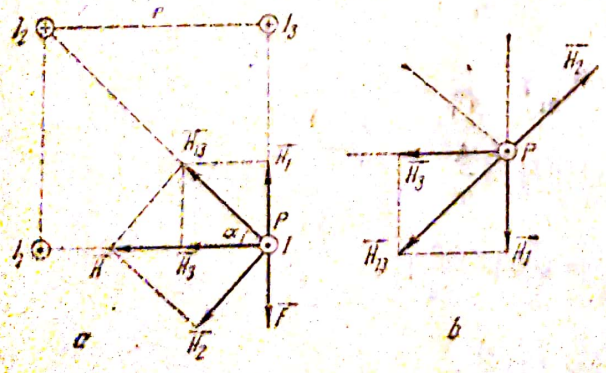


Fig. 3.17

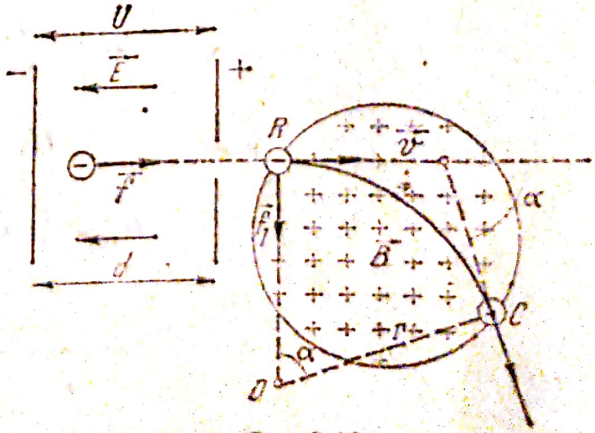


Fig. 3.18

b) Cîmpul magnetic acționează asupra electronului cu forța lorentziană $f_l = evB \sin 90^\circ = evB$, perpendiculară pe viteza $\vec{v}$ și pe $\vec{B}$. Ea joacă rol de forță centripetă și produce mișcarea circulară a electronului în jurul unui centru O cu raza r:

$$evB = \frac{mv^2}{r},$$

de unde:

$$r = \frac{mv}{eB} = \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot 10^8}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}014} = 4 \cdot 10^{-2}\text{m} = 4\text{ cm}.$$

c) Perioada T se obține din $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{eB}$;

$$T = \frac{2\pi m}{eB} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 9 \cdot 10^{-31}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}014} = 2{,}5 \cdot 10^{-9}\text{s}.$$

d) Din expresia lui r se deduce:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} = \frac{10^8}{0{,}014 \cdot 0{,}04} = 1{,}78 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}.$$

Întrebări, exerciții, probleme

1. Să se deseneze liniile cîmpului magnetic produs de conductoarele parcurse de curent din figura 3.19.
2. Să se stabilească sensul curenților care produc cîmpurile magnetice din figura 3.20.
3. Ce se întîmplă cu un flux de electroni de diferite viteze, care trec prin același cîmp magnetic, perpendicular pe liniile de cîmp?
4. O spirală metalică este suspendată de un suport (fig. 3.21), iar extremitatea ei inferioară este cufundată puțin într-un vas cu mercur. Să se explice fenomenul care se va produce dacă prin spirală circulă curent electric.
5. Există deosebire de natură fizică între forța electromagnetică și interacțiunea dintre două conductoare parcurse de curent electric?
6. Ce intensitate are cîmpul magnetic creat de un fir liniar la 10 cm depărtare de el, dacă este străbătut de 314 A?

Răspuns: $500 \frac{\text{A}}{\text{m}}$.

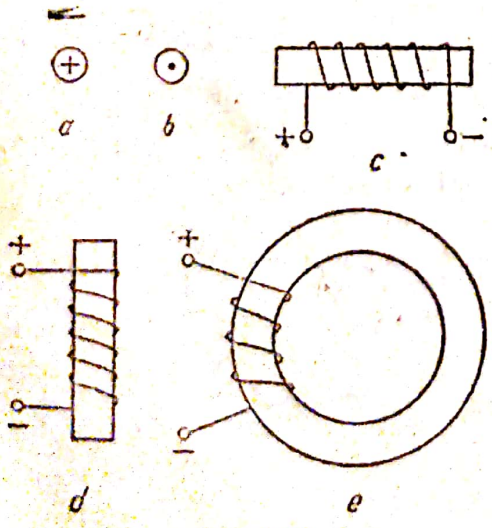


Fig. 3.19

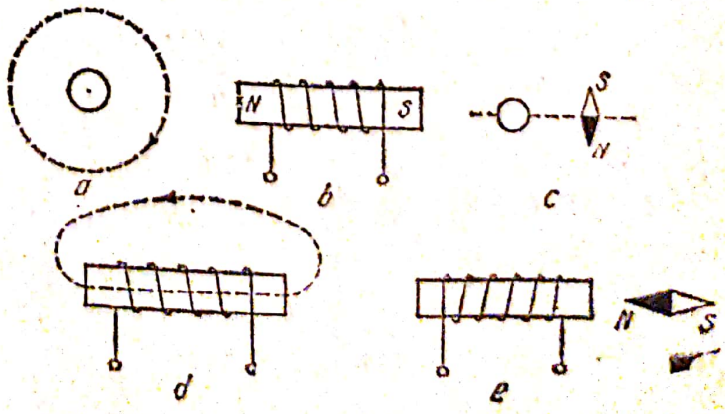


Fig. 3.20

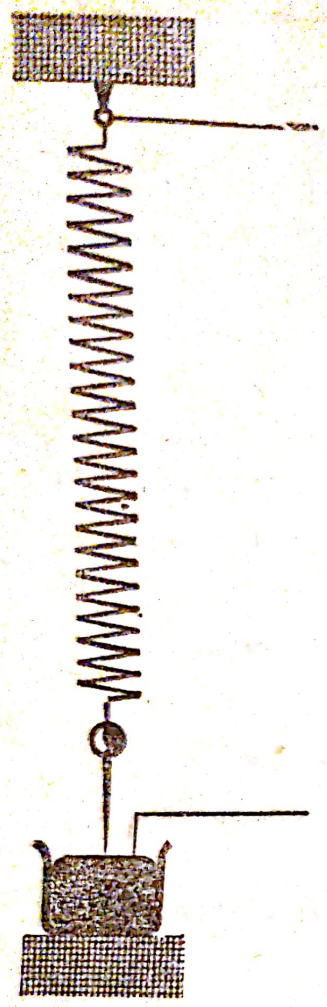


Fig. 3.21

7. Două conducte paralele aflate la 10 cm una de alta sînt parcurse de curenți în același sens. Prima este parcursă de 125,6 A, a doua de 31,4 A. Ce intensitate are cîmpul magnetic rezultant în punctele situate la jumătatea distanței dintre cele două conducte? Dar într-un punct exterior aflat la 5 cm de curentul cel mai slab și la 15 cm de celălalt? În ce puncte intensitatea cîmpului magnetic este nulă?

Răspuns: 300 $\frac{A}{m}$; 233,3 $\frac{A}{m}$; 8 cm față de curentul cel mai intens.

8. Printr-un solenoid cu 600 de spire, pe o lungime de 15 cm circulă un curent de 1,5 A. Ce valoare are intensitatea cîmpului în interior?

Răspuns: $6 \cdot 10^3 \frac{A}{m}$

9. O spiră circulară cu raza r s-a conectat la o tensiune electromotoare constantă. Cum se schimbă intensitatea cîmpului magnetic din centrul spirei dacă din ea se fac două spire cu raza de $\frac{r}{2}$?

Răspuns: se mărește de 4 ori.

10. Un generator este conectat la două vîrfuri opuse ale unui cadru pătrat de sîrmă. Care este intensitatea cîmpului magnetic produs în centrul cadrului de curenții care circulă prin laturile lui? (Indicație: se urmărește sensul cîmpului magnetic produs de curentul electric din fiecare latură a pătratului.)

Răspuns: zero.

11. Un cuptor este alimentat cu un curent electric de 2 000 A, care circulă prin două conductoare paralele așezate la 4 cm unul de altul. Ce forță se exercită între cele două conductoare, pe fiecare metru de lungime?

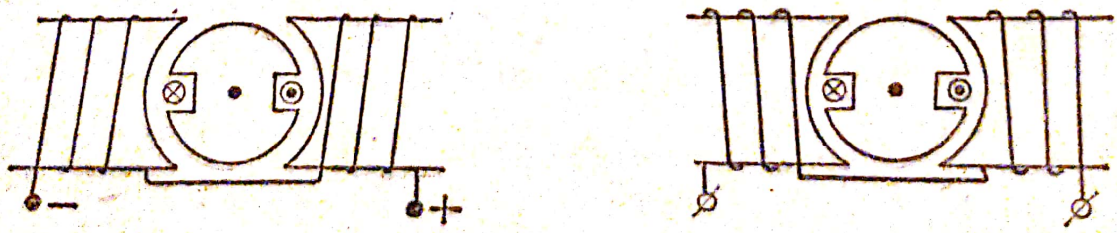
Răspuns: 20 $\frac{N}{m}$.

12. Într-un cîmp magnetic se găsește un conductor lung de 25 cm, așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic și parcurs de 100 A. Ce forță electromagnetică acționează asupra lui dacă inducția magnetică este de 0,8 T?

Răspuns: 20 N.

13. Să se determine sensul de rotație al electromotorului din figura 3.22, *a*.

14. Să se determine sensul curentului electric din înfășurarea electromagnetului (fig. 3.22, *b*) pentru ca electromotorul să se rotească în sensul acelor unui ceasornic.



a *b*

Fig. 3.22

Scanned with OKEN Scanner

15. Două conductoare rectilinii coplanare, parcurse de curentul I fac între ele 90°. Să se determine inducția $\vec{B}$ în punctele aflate la egală distanță de fiecare conductor.

Răspuns: 0 sau $\mu \frac{\mu_0 I}{\pi r}$.

16. Într-un cîmp magnetic uniform cu $B = 1{,}2$ T se află un conductor liniar lung de 80 cm, parcurs de 80 A, așezat perpendicular pe $\vec{B}$. Care este forța electromagnetică?

Răspuns: 76,8 N.

17. În vîrfurile ABC ale unui triunghi echilateral cu latura de 10 cm se află trei conductoare paralele. Prin B și C curenții sînt egali cu 6 000 A și de același sens. În A curentul are 12 000 A și este de sens contrar celorlalți. Se cere forța pe unitatea de lungime, a fiecărui conductor.

Răspuns: $144\sqrt{3}\frac{N}{m}$; $72\sqrt{3}\frac{N}{m}$.

18. O bobină toroidală cu raza medie de 8 cm are 5 000 spire. Ea este parcursă de un curent de 314 mA. Se cer:

a. intensitatea cîmpului magnetic în interior;

b. cum se poate obține aceeași intensitate cu un curent de 10 ori mai mare?

Răspuns: $3\,125\frac{A}{m}$; 500 de spire.

19. O particulă electrizată pozitiv intră cu viteza de $2 \cdot 10^3 \frac{m}{s}$ perpendicular pe liniile unui cîmp magnetic uniform cu inducția de 1 T și descrie un arc de cerc cu raza de 20,86 cm. Se cer:

a. sarcina specifică a particulei;

b. masa ei, dacă are $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C;

c. tensiunea electrică necesară pentru a accelera particula pînă la această viteză.

Răspuns: $9{,}6 \cdot 10^7 \frac{C}{kg}$; $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; $2 \cdot 10^6$ V.

20. O baterie este compusă din șase elemente galvanice legate în serie, avînd fiecare t.e.m. de 2 V și rezistența interioară de 0,15 Ω. În circuitul exterior se află o rezistență de 5 Ω, legată în serie cu un grup format dintr-o rezistență de 7 Ω în paralel cu un solenoid cu lungimea de 20 cm, avînd 300 de spire și rezistența activă de 3 Ω. Se cer:

a. tensiunea la bornele bateriei în circuit deschis și în circuit închis;

b. intensitatea principală și intensitățile în cele două ramuri;

c. cantitatea de căldură dezvoltată în două minute de către rezistența legată în paralel cu bobina;

d. inducția magnetică pe axul solenoidului;

e. fluxul magnetic printr-o spiră a solenoidului și fluxul total, spira avînd diametrul de 4 cm.

(Concurs de admitere, Institutul politehnic Gh. Gheorghiu-Dej, București—1966)

Răspuns: 12 V; 10,65 V; 1,5 A; 0,45 A; 1,05 A; 170,1 J; $1{,}98 \cdot 10^{-3}$ T; $7{,}46 \cdot 10^{-7}$ Wb; $2{,}49 \cdot 10^{-7}$ Wb.

Scanned with OKEN Scanner

B. Interacțiunea dintre cîmpul magnetic și substanță

3.14. Magnetizarea substanțelor. Prin introducerea într-un cîmp magnetic exterior, substanțele se magnetizează, unele mai mult, altele mai puțin. Odată cu dispariția cîmpului magnetizant unele din ele se demagnetizează, altele însă rămîn magnetizate, devenind magneți permanenți.

Experiență. Sub o bară din fier F (fig. 3.23, *a*) introdusă într-o bobină B este așezat un carton, pe care se găsesc cuie de fier. Cînd circulă curent prin bobină, bara de fier se magnetizează și atrage cuiele. La întreruperea curentului electric, bara de fier se demagnetizează și cuiele se desprind. Repetînd experiența cu o bară din oțel, aceasta rămîne magnetizată și după încetarea curentului electric.

Fierul se magnetizează temporar, dînd naștere unui electromagnet, oțelul se magnetizează permanent.

Experiență. Un magnet în formă de bară (fig. 3.23, *b*) este suspendat în fața unei bobine, așezată coaxial cu magnetul. La trecerea curentului electric prin bobină magnetul este atras sau respins, după sensul curentului din bobină. Prin cîmpul său magnetic, bobina se comportă ca o bară magnetică. Dacă în bobină se introduce un miez de fier, magnetul suspendat este atras ori respins cu forță mai mare. Miezul din fier produce o întărire a cîmpului magnetic al bobinei, prin cîmpul magnetic produs de el însuși prin magnetizare. Așadar: *fierul și alte substanțe asemănătoare lui* (nichel, cobalt, precum și diferite aliaje) *se magnetizează foarte puternic atunci cînd se află în cîmpuri magnetice exterioare.* Asemenea substanțe se numesc *feromagnetice.*

La cîmpul magnetic uniform $\vec{H}$, în care este așezată substanța feromagnetică (fig. 3.24, *a*), se adaugă și liniile cîmpului magnetic produs de bară prin magnetizare, ceea ce are ca urmare producerea unui cîmp magnetic foarte intens în interiorul

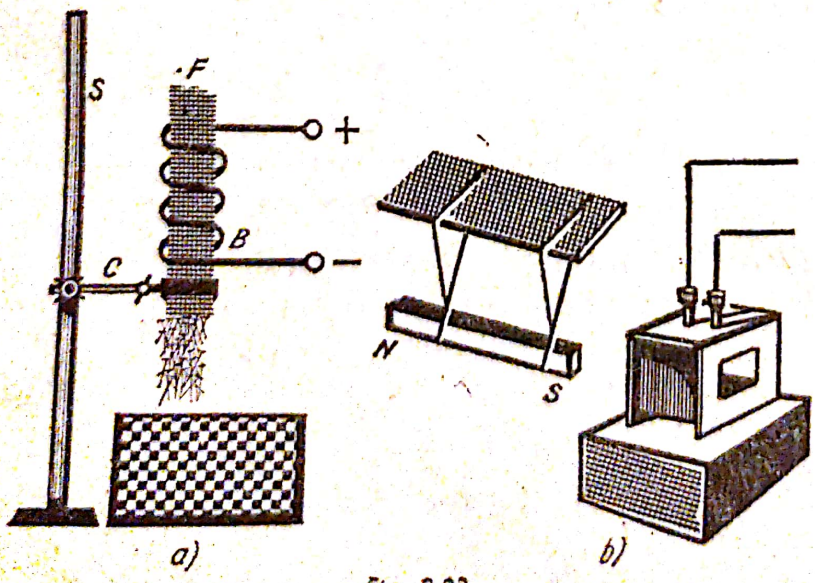


Fig. 2.23

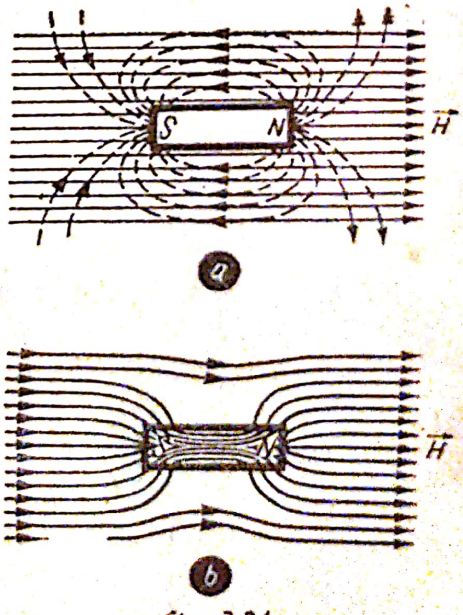


Fig. 3.24

barei (fig. 3.24, *b*). Acest cîmp are inducția de modul $B = \mu_r B_0$, unde $\mu \gg 1$ (mult mai mare decît 1). Există aliaje feromagnetice care au permeabilitatea relativă μ_r foarte mare. De exemplu, valorile maxime ale lui μ_r ajung pentru fier la $\mu_r = 5\,000$, pentru oțel electrotehnic la 10 000, pentru oțel-cobalt la 9 000, pentru aliajul permalloy (78,5% Ni + 21,5% Fe), la 100 000, pentru aliajul supermalloy, la 900 000. *Permeabilitatea magnetică a substanțelor feromagnetice nu este constantă; ea depinde de intensitatea H a cîmpului magnetizant*, dar și de faptul dacă substanța a mai fost înainte într-un cîmp magnetic sau nu. Se spune că substanțele feromagnetice „au memorie", din care cauză sînt utilizate la mașinile de calcul. Așadar, deși $B = \mu H$, la substanțele feromagnetice B nu variază proporțional cu H.

3.15. **Explicarea magnetismului.** Faptul că liniile de cîmp magnetic sînt închise dovedește că nu există sarcini sau mase magnetice care să genereze cîmpul magnetic, așa cum sarcinile electrice generează cîmpul electrostatic. Cîmpul magnetic este generat de curentul electric, cu care există simultan și formează aspecte diferite ale unui singur proces fizic. Pe de altă parte, prin divizarea unui magnet nu se obțin două bucăți cu cîte un pol magnetic, ci doi magneți cu cîte doi poli magnetici, oricît s-ar continua diviziunea magnetului.

Plecînd de la aceste fapte, Ampère, în 1825, a presupus că substanțele magnetice sînt formate din magneți moleculari, datorați existenței unor curenți moleculari. Fiecare curent molecular produce un magnet molecular. Datorită mișcării termice, magneții moleculari au distribuție dezordonată (fig. 3.25, *a*), încît cîmpurile lor magnetice se compensează reciproc, iar substanța în ansamblu nu prezintă proprietăți magnetice. Dacă substanța este introdusă într-un cîmp magnetic exterior (fig. 3.25, *b*) magneții moleculari sînt orientați în același sens și substanța se magnetizează. Suprimînd cîmpul magnetizant, substanța se demagnetizează.

Descoperirile ulterioare ale fizicii au confirmat ipoteza magneților moleculari a lui Ampère. Mișcarea unui electron în jurul nucleului atomic echivalează cu un curent electric I (fig. 3.26) care produce un cîmp magnetic de intensitate $\vec{H}$. Electronul mișcîndu-se în jurul nucleului atomic se comportă ca cel mai mic magnet posibil.

Acest magnet elementar, produs prin rotirea unui singur electron în jurul nucleului, este caracterizat printr-o mărime numită *moment magnetic*. Prin moment magnetic al unui curent se înțelege produsul între intensitatea curentului și suprafața limitată de el. Pornind de la această definiție, valoarea momentului magnetic al unui electron

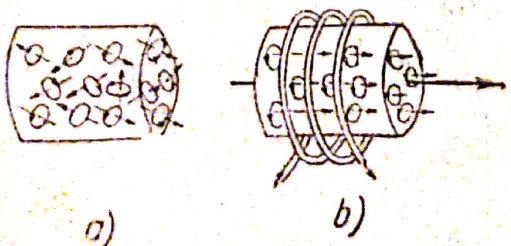


Fig. 3.25

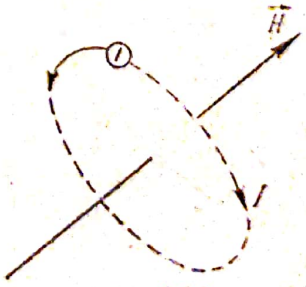


Fig. 3.26

Scanned with OKEN Scanner

(magneton) a fost calculată pentru întîia oară (1912) de către prof. Ștefan Procopiu de la Universitatea din Iași. Cum în fiecare atom se rotesc mai mulți electroni, în plane diferite, suma vectorială a magnetonilor dă valoarea cîmpului magnetic al atomului, adică un fel de „magnet molecular" în sensul imaginat de Ampère.

Ștefan Procopiu (n. 1890). Fizician român. A calculat cel dintîi (1912) momentul magnetic al electronului pe orbita în jurul nucleului (numit magneton Bohr). A descoperit (1921) efectul care îi poartă numele, care constă în depolarizarea longitudinală a soluțiilor coloidale și a suspensiilor cristaline. A descoperit (1929) discontinuitatea magnetizării la trecerea curentului alternativ printr-un fir feromagnetic.

Pentru explicarea completă a feromagnetismului trebuie să se țină seama și de rotația electronului în jurul axei sale proprii. Mișcarea electronului produce, de asemenea, un cîmp magnetic, a cărui acțiune duce la magnetizarea substanțelor feromagnetice, printr-un complex de fenomene, care depășesc cadrul studiului nostru. De asemenea, nucleele atomice au un moment magnetic.

3.16. **Para și diamagnetismul.** Unele substanțe ca aluminiul, manganul, cromul, staniul, aerul, oxigenul etc., puse într-un cîmp magnetic, se magnetizează în același sens cu cîmpul magnetizant, ca și cele feromagnetice, dar într-o măsură mult mai mică. Se numesc substanțe *paramagnetice*. Pentru ele permeabilitatea relativă este puțin mai mare decît unu, dar are valoare constantă. De exemplu, aluminiul are $\mu_r = 1{,}000022$.

Alte substanțe, ca: Bi, Hg, Ag, Cu etc., puse într-un cîmp magnetizant, se magnetizează foarte slab, dar în sens contrar cîmpului magnetizant. Se numesc substanțe *diamagnetice*. Ele au permeabilitatea relativă constantă, dar inferioară lui unu. De exemplu, Bi are $\mu_r = 0{,}99983$, iar la Cu $\mu_r = 0{,}99999$.

3.17. **Curba de magnetizare a fierului.** Studiul magnetizării și demagnetizării fierului se face confecționînd din el un miez pentru o bobină toroidală. Aceasta produce, cînd este parcursă de curent, un cîmp magnetic $\vec{H}$ uniform, care servește drept cîmp magnetizant pentru miezul de fier. Să urmărim valorile inducției magnetice $\vec{B}$ produse într-un miez de fier — care nu a mai fost magnetizat — de către cîmpul magnetizant $\vec{H}$. Acesta poate varia de la zero la o valoare pozitivă sau negativă, după cum variază curentul în bobină. Se obține curba de magnetizare înscriind pe axa absciselor valorile lui $\vec{H}$, iar pe axa ordonatelor, valorile corespunzătoare ale lui $\vec{B}$ (fig. 3.27). Pe măsură ce crește H, crește și B, la început mai repede, apoi mai încet, pînă ajunge la o valoare de saturație B_s, care corespunde cîmpului magnetizant H_1. Valorile lui B descriu curba OA_1. Făcînd să scadă cîmpul magnetizant către zero, scad și valorile corespunzătoare ale inducției magnetice, dar nu pe curba de primă magnetizare OA_1, ci pe curba A_1A_2. La demagnetizare, unei aceleiași valori H îi corespunde pentru B o valoare $B_2 > B_1$. Cînd cîmpul magnetizant H devine zero, inducția B nu se anulează, ci ajunge

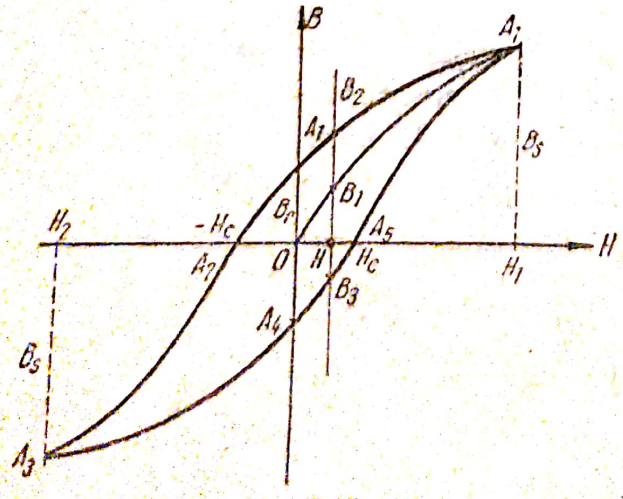


Fig. 3.27

la o valoare B_r, numită *inducție remanentă*. Cu cît această valoare este mai mare, cu atît magnetismul remanent este mai intens; ca la magneții permanenți bunăoară. Pentru anularea magnetismului remanent ($B = 0$), este necesar un cîmp magnetizant H_c, de sens contrar celui inițial, numit *cîmp coercitiv*.

Cînd cîmpul magnetizant ajunge la valoarea $H_2 = -H_1$, inducția atinge valoarea de saturație $B'_s = -B_s$. Crescînd cîmpul magnetizant de la H_2 la H_1, valorile lui B descriu curba $A_2A_4A_5A_1$. Se obține astfel o curbă închisă, numită ciclu de *histerezis magnetic*. Aria cuprinsă de această curbă de magnetizare reprezintă energia electromagnetică disipată pentru un ciclu de magnetizare. Pentru o valoare H a cîmpului magnetizant, inducția magnetică poate lua diferite valori: B_1 la întîia magnetizare, B_2 sau B_3 care depind de magnetizările anterioare ale substanței.

Materialele feromagnetice utilizate ca miezuri de bobine, de transformatoare etc. trebuie să aibă aria închisă de curba ciclului de histerezis cît mai mică. Materialele pentru magneții permanenți trebuie să aibă această arie cît mai mare.

3. Aplicații ale fenomenelor electromagnetice

3.18. **Electromagneți.** Electromagnetul este un circuit magnetic format dintr-un miez feromagnetic introdus într-o înfășurare de excitație. Electromagnetul este un dispozitiv care stă la baza celor mai variate aplicații electrotehnice. Forma lor depinde de scopul în care vor fi utilizați. În general, ei pot fi în formă de bară (fig. 3.28, *a*), în formă de potcoavă (fig. 3. 28, *b*), ori în formă de clopot (fig. 3.28, *c*). Pentru ca electromagneții să fie cît mai puternici, trebuie să aibă circuitul magnetic închis, or un întrefier cît mai strimt.

Experiențe. Într-o bobină se introduce un miez de fier și se trece prin bobină un curent electric (fig. 3.29). Electromagnetul-bară format atrage cuie de fier. Se repetă

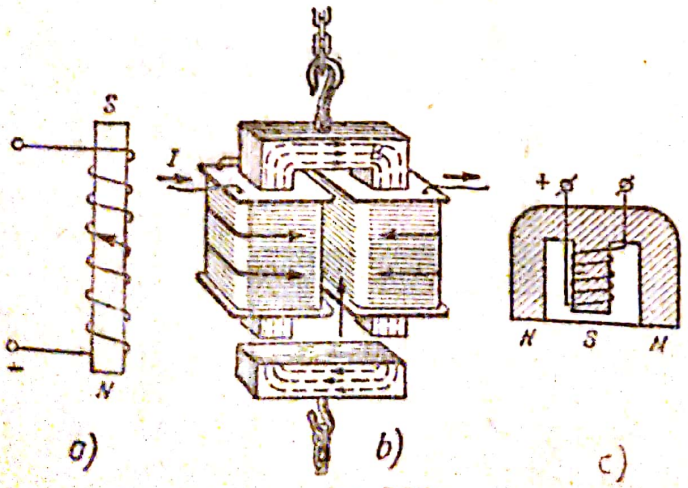


Fig. 3.28

Fig. 3.29

experiența cu aceeași bobină, parcursă de același curent, însă cu un miez în formă de potcoavă și se obține un electromagnet mai puternic, care atrage cuie de fier mai multe. În acest din urmă caz, liniile de inducție magnetică parcurg un drum mai scurt prin aer între polii electromagnetului. Se închide circuitul magnetic, aplicînd pe amîndoi polii electromagnetului o bară de fier (armătură). Forța necesară pentru a o desprinde de magnet devine mult mai mare.

3.19. **Electromagnetul polarizat** este un electromagnet care are miezul de fier A_1 și A_2 (fig. 3.30) în contact cu polii unui magnet permanent. Bobinele B_1 și B_2 legate în serie magnetizează armăturile de fier A_1 și A_2, producînd în ele cîmpuri magnetice care se compun cu cîmpul produs de magnetul permanent. Cînd curentul circulă într-un sens (fig. 3.30, *a*) cîmpurile produse de bobinele B_1 și B_2 sînt de același sens cu cîmpul magnetului permanent pe care îl întăresc. Cînd curentul circulă în sens contrar (fig. 3.30, *b*), cîmpurile produse de bobinele B_1 și B_2 sînt de sens opus cîmpului magnetului permanent pe care îl slăbesc. Aplicații ale electromagnetului polarizat sînt difuzorul electromagnetic, receptorul telefonic etc. Electromagneții sînt foarte utilizați la dispozitive de semnalizare și automatizare, la transportarea greutăților, la crearea cîmpurilor magnetice intense, la instrumentele de măsurat etc.

3.20. **Difuzor electrodinamic cu magnet permanent.** Cîmpul magnetic foarte puternic este creat de un magnet (E) de formă specială (fig. 3.31). Partea exterioară are forma unui pahar avînd o deschidere circulară, care formează unul din poli P_1. Partea centrală este un cilindru, care intră în deschiderea circulară P_1, formînd al doilea pol P_2. Între cei doi poli P_1 și P_2 se găsește un spațiu inelar, în care se for-

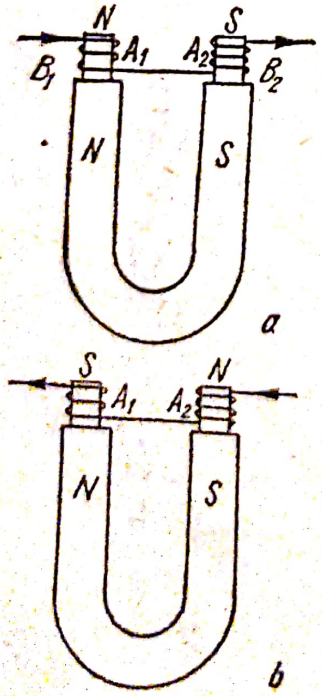


Fig. 3.30

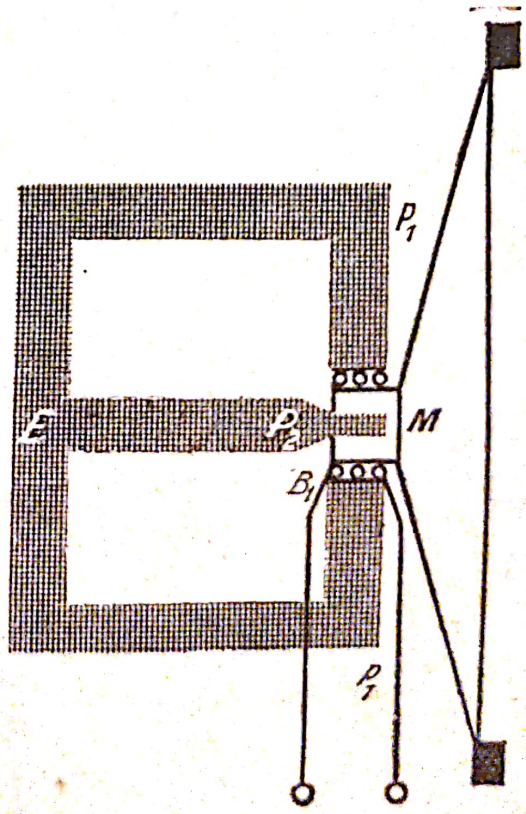


Fig. 3.31

mează un cîmp magnetic extrem de intens. În acest spațiu inelar, în jurul polului P_2, se află o bobină B_1 foarte ușoară și mobilă, numită bobină sonoră, solidar legată de membrana în formă de pîlnie M a difuzorului. La bobina sonoră B_1 se aduce curentul cu frecvență sonoră de la un receptor sau de la un microfon. Cîmpul magnetic al bobinei sonore interacționează cu cîmpul magnetic al magnetului, iar forța electromagnetică formată face ca bobina sonoră să oscileze în ritmul modulațiilor curentului cu frecvență sonoră. Oscilațiile bobinei B_1 se transmit membranei iar aceasta pune în oscilație aerul, încît se reproduce sunetul produs în fața microfonului.

3.21. **Aparate electrice de măsurat.** Pentru măsurarea intensității și tensiunii curentului electric se folosesc aparate numite ampermetre, respectiv voltmetre. După principiul lor de funcționare, aparatele electrice de măsurat cele mai răspîndite sînt de două feluri:

electromagnetice sau cu bobină fixă și magnet mobil (fig. 3.32);

magnetoelectrice sau cu magnet fix și cadru mobil (fig. 3.33).

Orice aparat electric de măsurat este format din două părți: una fixă, numită *stator* și alta mobilă, mumită *echipaj mobil*. Între cele două părți ale aparatului se exercită forțe electromagnetice; ca urmare a acțiunii acestor forțe ia naștere un cuplu de forțe, care rotește echipajul mobil, cu un unghi oarecare față de stator. Echipajul mobil este solidar cu un ac indicator, care marchează unghiul de rotație ce poate fi citit pe o scală gradată. Unghiul de rotație a echipajului, deci a acului indicator,

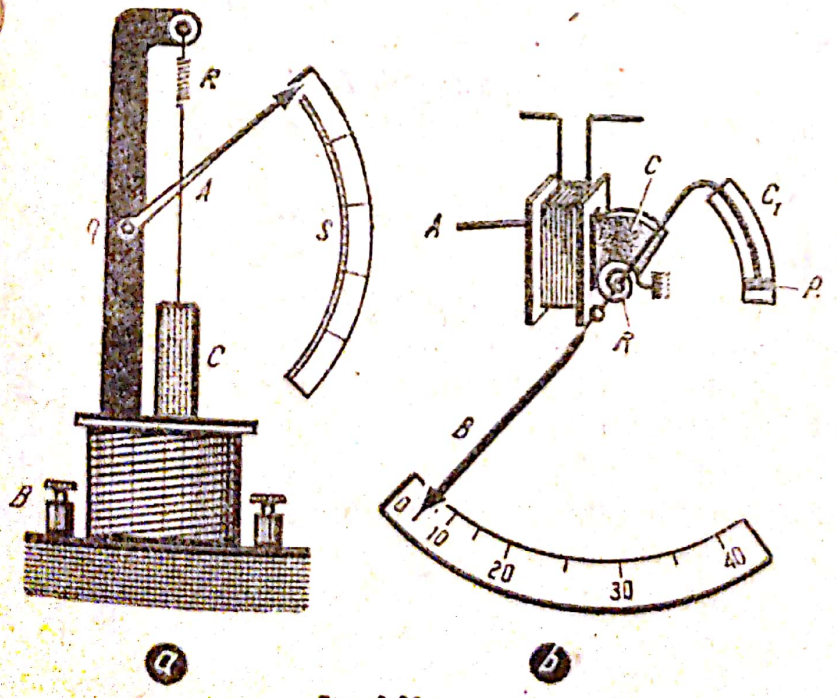


Fig. 3.32

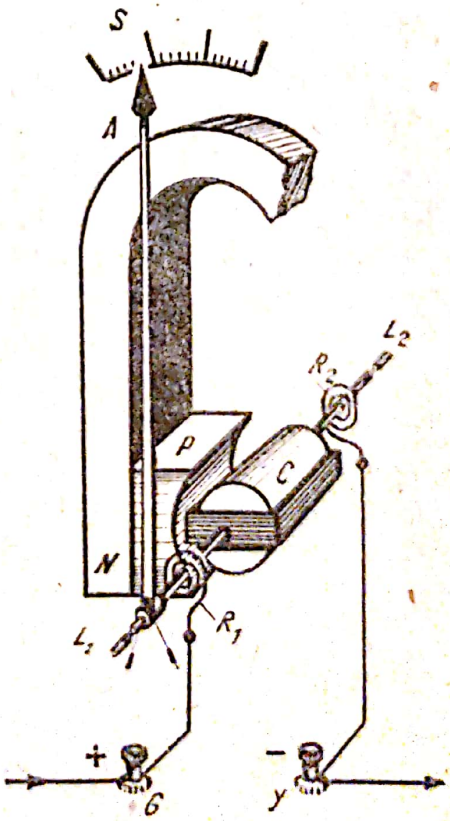


Fig. 3.33

este limitat la o anumită valoare de către un cuplu antagonist produs, de cele mai multe ori, de un resort spiral. Acesta este fixat cu un capăt de stator și cu celălalt de echipajul mobil. Cuplul antagonist echilibrează pe cel produs de forțele electromagnetice, într-o poziție deviată de un unghi mai mare sau mai mic, după cum intensitatea curentului ce produce forța electromagnetică este mai mare sau mai mică.

La aparatele magnetoelectrice statorul este un magnet permanent, iar echipajul mobil este o bobină, numită cadru mobil (fig. 3.33), care este parcursă de curentul de măsurat.

La aparatele electromagnetice statorul este o bobină prin care trece curentul de măsurat, iar echipajul mobil poate fi un cilindru de fier (fig 3. 32, *a*) sau o piesă plată *C* din fier (fig. 3.32, *b*).

Ampermetrul. Ampermetrele pot fi electromagnetice sau magnetoelectrice.

a) *Ampermetrul electromagnetic* este format dintr-o bobină *B* (fig. 3.32, *a*), parcursă de curentul electric de măsurat. Această bobină magnetizează un cilindru *C* din fier, pe care îl atrage în interiorul ei. Resortul *R*, de care este suspendat cilindrul, echilibrează forța de atracție dintre bobină și cilindrul *C*. Acul indicator, fixat de fir în *A*, este rotit în jurul axului *O* și indică o deviație, care este proporțională cu pătratul intensității curentului de măsurat, de aceea un asemenea ampermetru poate fi utilizat și la curentul alternativ. În figura 3.32, *b* este schema unui ampermetru electromagnetic perfecționat, cum se folosește în practică. Statorul este format din bobina *A*, iar echipajul mobil este piesa plată din fier *C*. Aceasta este atrasă în bobina *A*, cînd este parcursă de curentul de măsurat. Resortul spiral *R* formează cuplul antagonist și readuce echipajul mobil la poziția de echilibru.

b) Ampermetrul magnetoelectric cu cadru mobil și magnet permanent are statorul format dintr-un magnet permanent. Echipajul mobil este format dintr-o bobină sau cadru mobil în jurul unui ac, prins la capete în două lagăre L_1 și L_2, cu frecare cît mai mică (fig. 3.33). Cînd nu circulă curent prin bobina-cadru, ea este ținută în poziția de zero de către resorturile R_1 și R_2. Cîmpul magnetic produs de magnetul permanent, concentrat de piesele polare *P* și cilindrul de fier *C*, acționează asupra cadrului cînd este parcurs de curent și îl rotește pînă la o poziție de echilibru, care depinde de intensitatea curentului ce circulă prin cadru. Unghiul de rotație este arătat pe scala gradată *S*, de pe cadranul în fața căruia se mișcă acul indicator *A*, solidar legat cu cadrul. Curentul de măsurat intră printr-o bornă (*G*), trece prin bobina cadru și iese prin cealaltă bornă (*Y*). Deviațiile acului indicator sînt proporționale cu intensitatea curentului care trece prin cadru. Rezistența cadrului *R* trebuie să fie mică, pentru ca instrumentul să nu modifice sensibil intensitatea curentului de măsurat, deoarece ampermetrul se conectează în serie în circuitul prin care circulă curentul electric de măsurat. Intensitatea maximă pe care o poate măsura direct ampermetrul se numește curent nominal. Prin ampermetru nu trebuie să circule curenți mai mari decît curentul său nominal. De aceea, în practică, se folosesc șunturi pentru a mări domeniul de utilizare a ampermetrului.

Scanned with OKEN Scanner

Voltmetrul. Este un aparat pentru măsurat tensiunea electrică la bornele unei surse electrice sau ale unui receptor de energie electrică. Voltmetrul se montează în paralel cu circuitul la bornele căruia trebuie măsurată diferența de potențial. De aceea trebuie să aibă o rezistență foarte mare. Voltmetrul se bazează pe aceleași principii ca și ampermetrul, putînd fi magnetoelectric sau electromagnetic. El măsoară intensitatea curentului care trece prin el; această intensitate I înmulțită cu rezistența sa R_v dă tensiunea $U = IR_v$, dintre bornele sale. Pe scală sînt notate chiar tensiunile U. Orice ampermetru poate fi transformat într-un voltmetru, adăugîndu-i o rezistență adițională potrivită.

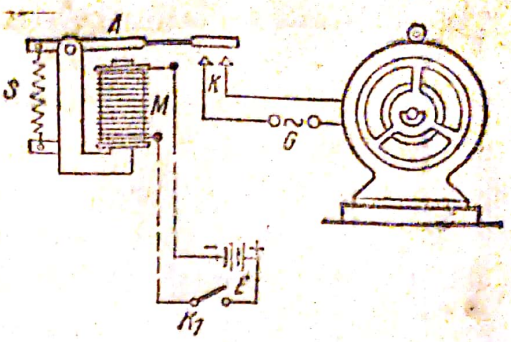


Fig. 3.34

3.22. **Releul electromagnetic** este un dispozitiv important în automatizare ca și la comanda la distanță a mașinilor.

Să presupunem că este nevoie de acționarea la distanță (punerea sau scoaterea din circuit) a unui motor electric (fig. 3.34) care se găsește la o distanță ceva mai mare de locul de comandă. De la întrerupătorul K_1 pînă la motor s-ar produce pierderi mari de energie electrică în conductoarele de legătură, deoarece curentul necesar pentru funcționarea motorului este intens. Problema se rezolvă cu ajutorul releului, care folosește un curent slab pentru a închide sau deschide un circuit de curent tare aflat la distanță. Motorul este alimentat cu curent intens de la o sursă locală G. Întrerupătorul K se închide prin apăsarea produsă de armătura A a unui electromagnet M. Acesta este alimentat de un curent slab, care vine de la un generator E, aflat la locul de comandă, adică la distanță mare de electromagnet și motor. În felul acesta, comanda se face prin întrerupătorul K_1 și este transmisă prin curent slab pînă la electromagnetul releului; acesta închide circuitul local de alimentare al motorului cu curent intens.

Releul electromagnetic are forme foarte variate, după modul lui de utilizare.

Întrebări, exerciții, probleme

1. De ce produsul NI se numește t.m. motoare?
2. Ce semnificație fizică are fenomenul de histerezis magnetic?
3. Cum se poate explica fenomenul de saturație magnetică?

Scanned with OKEN Scanner

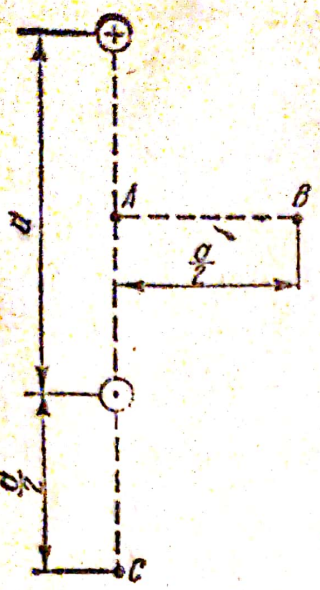


Fig. 3.35

4. Să se calculeze cîmpul magnetic care produce o inducție magnetică de 1 tesla într-un miez de fier cu permeabilitatea magnetică relativă egală cu 800.

Răspuns: $995{,}5 \frac{A}{m}$.

5. Să se calculeze fluxul magnetic într-un miez de oțel cu secțiunea transversală de 30 cm², știind că se găsește într-un cîmp magnetizant uniform de $\frac{10^4}{4\pi} \frac{A}{m}$ și are permeabilitatea magnetică relativă egală cu 750.

Răspuns: $225 \cdot 10^{-7}$ Wb.

6. Cîte spire trebuie să aibă un solenoid lung de 50,24 cm, avînd secțiunea de 10 cm² și un miez de fier cu permeabilitatea magnetică relativă egală cu 200, pentru ca fiind parcurs de 2A să aibă un flux magnetic de 10^{-2} Wb?

Răspuns: 100 de spire.

7. Un cadru format din 5 spire are raza de 20 cm. Ce intensitate trebuie să circule prin el pentru ca în centru să se producă un cîmp magnetic de $50 \frac{A}{m}$?

Răspuns: 4 A.

8. Printr-un solenoid cu 30 de spire trece un curent de 8A. Ce intensitate de curent trebuie să circule prin alt solenoid, cu aceleași dimensiuni, dar care are 24 de spire, pentru a se obține același flux magnetic ca și în primul?

Răspuns: 10 A.

9. Un cadru dreptunghiular cu suprafața de 300 cm² se rotește uniform într-un cîmp magnetic uniform de $200 \frac{A}{m}$. Axul de rotație este perpendicular pe liniile cîmpului și trece prin centrul cadrului, paralel cu latura mai lungă. Să se reprezinte grafic variația fluxului magnetic prin suprafața spirei, știind că rotația se face cu 1 000 rad/s. (Indicație: se va exprima fluxul în funcție de unghiul $\alpha = \omega t$, pe care îl face cîmpul magnetic cu normala la suprafața cadrului.)

10. Să se determine inducția magnetică în punctele A, B, C (fig. 3.35) dacă $a = 40$ cm, iar curenții din conductoare au fiecare 10^3 A și sînt în sens contrar.

Răspuns: $2 \cdot 10^{-3}$ T; 10^{-3} T; $\frac{2}{3} 10^{-3}$ T.

11. Un solenoid cu 600 de spire și 15 cm lungime este parcurs de 1,5 A. Miezul are $\mu_r = 10^3$ și secțiunea de 10 cm². Se cer:
a. intensitatea cîmpului magnetic și inducția magnetică într-un punct din interior;
b. fluxul de inducție total.

Răspuns: $6 \cdot 10^3 \frac{A}{m}$; 7,5 T; 4,5 Wb.

12. O bobină toroidală are lungimea medie de 40 cm, secțiunea de 5 cm² și 400 de spire, prin care circulă 20 A. Se cere fluxul magnetic total. Ce curent trebuie să circule prin spire pentru ca fluxul să fie $2 \cdot 10^{-5}$ Wb?

Răspuns: $1{,}6\pi \cdot 10^{-7}$ Wb; $\frac{0{,}25}{\pi}$ A.

13. Ce permeabilitate relativă are miezul unei bobine toroidale cu raza medie de 15 cm și 1 000 de spire care fiind parcursă de 7 A produce o inducție magnetică de 1 T?

Răspuns: 1 517.

Scanned with OKEN Scanner

4. Inducţie electromagnetică

4.1. Tensiunea electromotoare indusă şi legile ei

4.1. Inducţia electromagnetică. Michael Faraday a descoperit fenomenul de inducţie electromagnetică în 1831. El a constatat că prin variaţia unui cîmp magnetic se poate produce curent electric.

Experienţă. Circuitul unei bobine se închide printr-un galvanometru (fig. 4.1, *a*). Neexistînd generator în circuitul electric, acul galvanometrului nu deviază. La introducerea unui magnet în bobină, se constată că acul galvanometrului deviază atîta timp cît magnetul intră în bobină, dar revine la zero cînd magnetul se opreşte. La scoaterea magnetului din bobină acul galvanometrului deviază în sensul opus celui precedent. Prin urmare, la mişcarea magnetului în bobină ia naştere un curent electric. Un asemenea curent se numeşte *curent indus*.

Se obţin aceleaşi rezultate dacă magnetul rămîne fix şi se mişcă bobina (fig. 4.1, *b*).

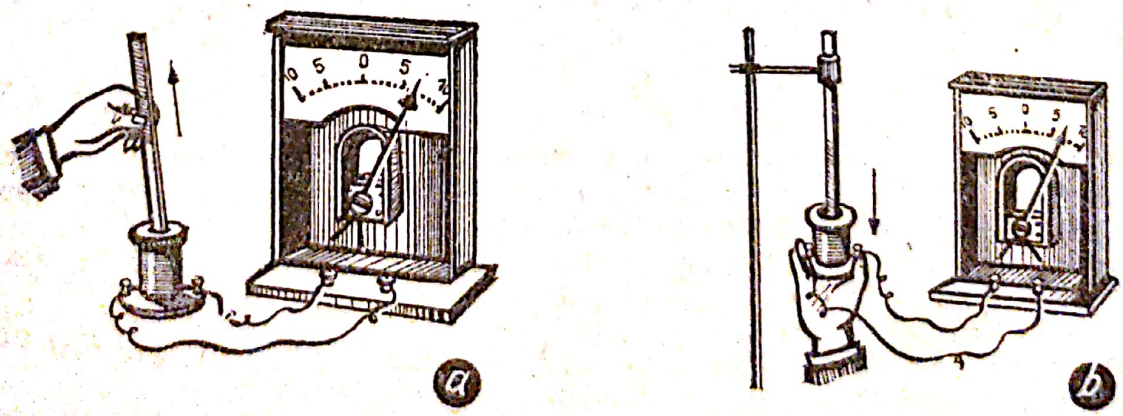


Fig. 4.1

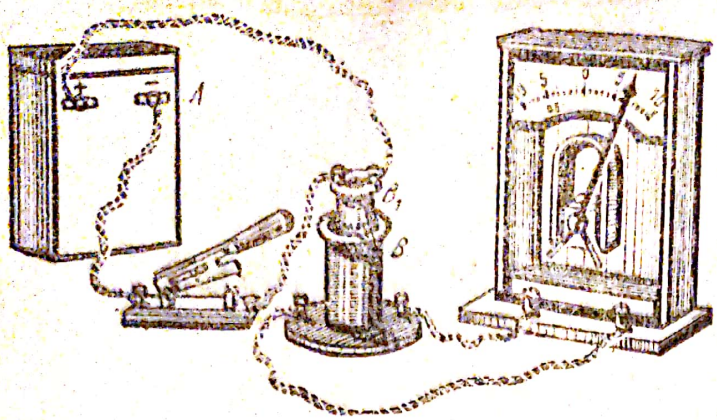


Fig. 4.2

Experiență. Se folosește aceeași bobină B, avînd în circuit un galvanometru. În această bobină B (fig. 4.2) poate fi introdusă o a doua bobină B_1, cu diametru mai mic. Prin bobina B_1, circulă un curent produs de un generator A. Introducînd bobina B_1, în bobina B, atunci cînd prin B_1 circulă curent electric, se constată că în circuitul bobinei B apare un curent indicat de galvanometru. Acest curent este un curent indus și de aceea bobina B poartă numele de *indus* sau *bobină secundară*. Bobina B_1 se numește *bobină primară* sau *inductor*. Subliniem că firele conductoare ale celor două bobine nu sînt în legătură. Fiecare bobină aparține unui circuit separat. Curentul electric indus se menține cît timp se schimbă poziția relativă a bobinelor. Rezultatele sînt deci aceleași ca mai înainte, cînd în locul bobinei B_1 se folosea un magnet. Magnetul ca și bobina B_1 produc cîmp magnetic. În timpul cît se schimbă poziția relativă a magnetului sau inductorului B_1 față de bobina secundară, aceasta este străbătută de un număr variabil de linii de cîmp, adică de un *flux magnetic variabil*. Acestui fapt i se datorează producerea în bobină a unei tensiuni electromotoare, care produce curent indus.

- Fenomenul de producere a unei tensiuni electromotoare într-un circuit care înconjură un flux magnetic variabil se numește inducție electromagnetică.

Variația fluxului magnetic inductor poate fi produsă prin diferite metode. De exemplu, fluxul magnetic variază printr-un circuit care stă nemișcat într-un cîmp magnetic variabil (exemplu în fig. 4.1, *a*). Fluxul magnetic poate varia prin mișcarea circuitului în cîmp magnetic variabil (ca în fig. 4.1, *b*). Din cele arătate pînă aici rezultă că t.e.m. indusă durează numai atît cît durează cauza sa, variația fluxului inductor.

Cum am amintit mai înainte, sînt și alte mijloace de variație a fluxului magnetic inductor.

Experiență. Se folosește montajul din figura 4.2 și se introduce sau se scoate o bară de fier din bobina B_1. Se produce un curent indus foarte puternic. Deși curentul electric care circulă prin B_1 este constant, deci și cîmpul magnetic din bobina B e constant, introducerea miezului de fier face să crească numărul liniilor de forță de μ_r ori, adică fluxul inductor crește tot de μ_r ori. Așadar, *în acest caz t.e.m. indusă este cauzată de variația fluxului inducției magnetice din bobina inductoare și mărimea ei depinde de valoarea permeabilității magnetice.*

Fluxul magnetic inductor mai poate fi variat prin stabilirea sau întreruperea circuitului inductor, prin creșterea sau micșorarea intensității curentului inductor, prin deformarea circuitului secundar aflat într-un cîmp magnetic constant, precum și prin mișcarea unui conductor într-un cîmp magnetic constant, așa fel încît conductorul să intersecteze liniile cîmpului magnetic.

Scanned with OKEN Scanner

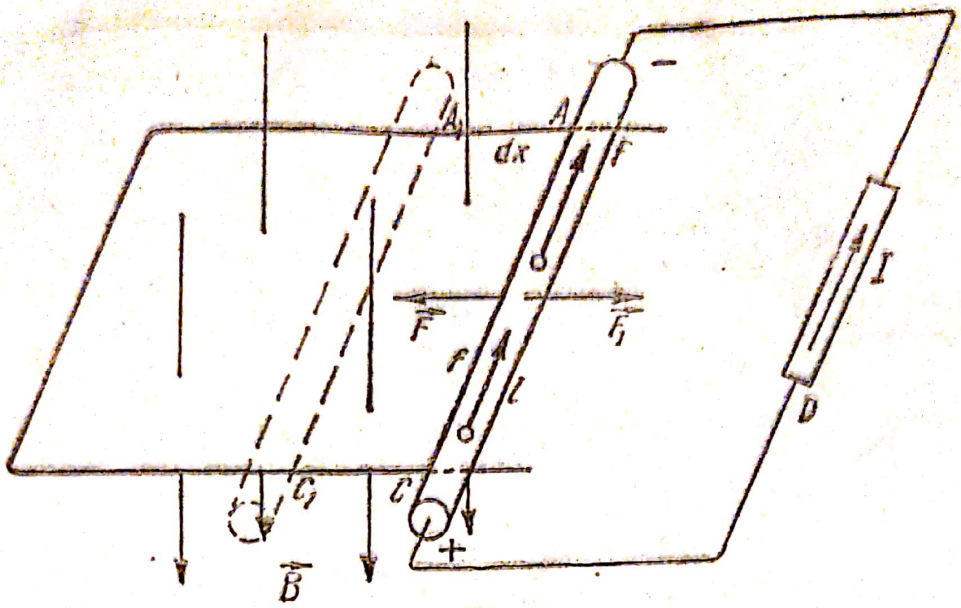


Fig. 4.3

4.2. Mărimea tensiunii electromotoare induse.

Se poate deduce expresia generală a legii inducției electromagnetice pe baza conservării energiei.

Conductorul mobil de lungime $l = AC$ (fig. 4.3) este acționat de o forță exterioară $\vec{F}$, care-l deplasează pe o lungime foarte mică $dx = AA_1$, într-un interval de timp dt, efectuînd lucrul mecanic $dL = F\ dx$.

Datorită deplasării în cîmpul de inducție $\vec{B}$, asupra fiecărui electron liber din conductor va acționa o forță lorentziană $\vec{f}$, avînd ca urmare încărcarea negativă a capătului A și pozitivă a capătului C. Între capetele conductorului apare o tensiune e. Dacă se închide circuitul $ACDA$, tensiunea indusă e devine t.e.m. pentru circuit, producînd curentul mediu I. Ca urmare, conductorul mobil va fi supus unei forțe electromagnetice $F_1 = BIl$. Conform legii acțiunilor reciproce $\vec{F}_1 = -\vec{F}$. În aceste condiții $dL = -BIl\ dx$.

Conform legii conservării energiei, ca urmare a efectuării lucrului mecanic dL asupra sistemului material, el va trece într-o stare căreia îi va corespunde o creștere a energiei electrice cu o valoare $dW = dL$. Deoarece $dW = eIdt$, $dL = -BIldx = eIdt$.

Dar $l\ dx = dS$ (aria măturată de conductor în deplasare) și $BdS = d\Phi$ (variația fluxului corespunzătoare deplasării conductorului), încît:

$$dL = -Id\Phi = eIdt$$

de unde se deduce:

$$\boxed{e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi'(t)} \qquad (1)$$

numită *legea lui Faraday*.

Michael Faraday (1791–1867). Fizician și chimist englez. A început ca ucenic la un legător de cărți, apoi laborant, mai tîrziu asistent al lui Davy, apoi profesor. Foarte bun experimentator. A descoperit inducția electromagnetică (1831), legile electrolizei (1834), a demonstrat legea conservării sarcinii electrice (1843), a descoperit acțiunea cîmpului magnetic asupra luminii. A introdus noțiunea de linii de cîmp electric și linii de cîmp magnetic etc. A constatat că acțiunile electrice și magnetice se transmit din aproape în aproape. Dezvoltarea acestor concepții de către Maxwell a dus la descoperirea undelor electromagnetice și la teoria electromagnetică a luminii.

Citul dintre variația fluxului magnetic inductor și intervalul de timp în care se produce această variație reprezintă cantitatea cu care variază fluxul inductor într-o unitate de timp. Acest cît poartă numele de *viteză de variație a fluxului magnetic inductor*. Așadar, legea inducției electromagnetice se enunță astfel:

Tensiunea electromotoare indusă este proporțională cu viteza de variație a fluxului magnetic inductor (derivata fluxului inductor în raport cu timpul).

Ca t.e.m. indusă să fie exprimată în volți, adică în unități *SI*, va trebui ca fluxul de inducție în relația 1 să fie exprimat, de asemenea, în unități *SI*, adică în weberi.

În cazul cînd bobina indusă nu are circuitul închis, prin ea nu circulă curent indus; în circuitul ei însă ia naștere o t.e.m. indusă, dacă ea intersectează un flux inductor variabil. O asemenea bobină se comportă ca un generator electric în circuit deschis: între capetele bobinei există o diferență de potențial egală cu t.e.m. indusă.

Curentul de inducție este determinat de existența cîmpului electric. Deci, efectul direct al variației fluxului este apariția cîmpului electric indus în regiunea circuitului. Maxwell a demonstrat teoretic și experiențele au confirmat că:

- Fenomenul de inducție electromagnetică se produce datorită unui cîmp magnetic variabil, chiar în absența unui circuit. În absența circuitului, prin variația fluxului magnetic la naștere un cîmp electric indus, în general variabil (fig. 4.4, a), care are liniile de cîmp închise. Deci, în sens mai larg, prin fenomenul de inducție electromagnetică se înțelege apariția unui cîmp electric variabil în regiunea în care există un flux magnetic variabil.

Este evident că, dacă în regiunea fluxului magnetic variabil s-ar găsi un conductor (fig. 4.4, *b*) cîmpul electric indus ar pune în mișcare electronii liberi din el, făcînd să apară astfel la capetele A și B o diferență de potențial. Dacă acest conductor ar constitui circuit închis, atunci ia naștere curentul indus, ca efect al t.e.m. induse (fig. 4.4, *c*).

4.3. **Sensul tensiunii induse.** Se constată experimental că sensul tensiunii induse depinde de sensul variației fluxului magnetic inductor.

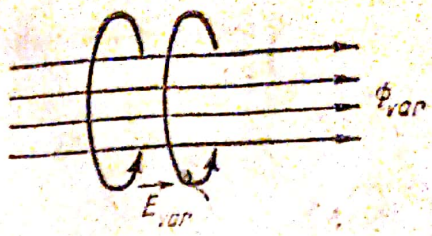
Experiență. Se introduce un miez de fier într-o bobină B (fig. 4.5). La un capăt al miezului de fier, și fără a se atinge de el, se suspendă prin două fire un inel de aluminiu A. Se trece un curent electric prin bobină. În timpul stabilirii circuitului, inelul este respins de bobina inductoare B, în timp ce, la întreruperea curentului, inelul este atras.

La închiderea circuitului, curentul inductor și fluxul magnetic inductor cresc, adică $\Delta\Phi > 0$. Variația fluxului induce în inel un curent. Deoarece inelul este respins, înseamnă că, în spira de aluminiu, curentul indus este de sens contrar celui inductor din bobina B (interacțiune între curenți). Prin urmare, fluxul magnetic efect (indus) este de sens contrar fluxului magnetic cauză (inductor), cînd fluxul magnetic cauză (inductor) crește. *Fluxul indus se opune creșterii fluxului inductor.* La întreruperea curentului electric, fluxul magnetic inductor scade $\Delta\Phi < 0$, și induce un curent în inelul de aluminiu. Atragerea inelului arată că, în spira de aluminiu, curentul indus este de același sens celui inductor din bobina B. *Fluxul indus se opune scăderii fluxului inductor.*

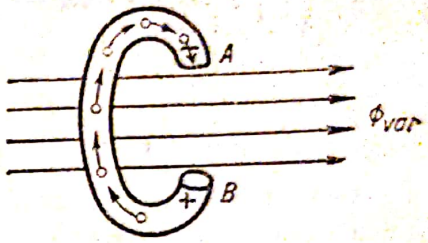
H.F.E. Lenz (1804—1865) a generalizat, în 1833, aceste rezultate și a găsit o regulă cu ajutorul căreia se poate determina sensul curentului indus, în toate cazurile.

Tensiunea indusă are un astfel de sens încît prin cîmpul magnetic la care dă naștere, curentul indus se opune variației fluxului magnetic inductor. Din această cauză în formula (1) tensiunea indusă are semnul minus.

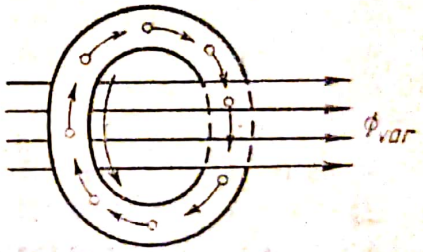
Să aplicăm această lege în cazul scoaterii magnetului din bobina secundară (fig. 4.6). Fluxul magnetic inductor scade, deci tensiunea indusă va genera un cîmp magnetic indus de același sens cu cîmpul inductor, pentru a împiedica scăderea fluxului inductor. Bobina secundară va forma un pol sud la capătul de care se depărtează polul nord al magnetului, ca să împiedice scăderea fluxului. Fenomenele se petrec asemănător în toate cazurile.



a)



b)



c)

Fig. 4.4

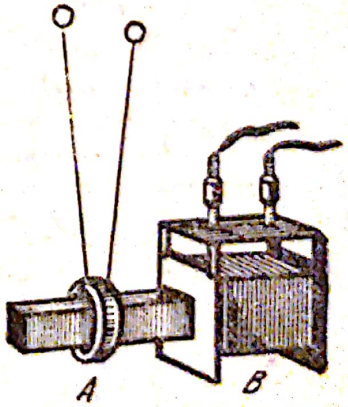


Fig. 4.5

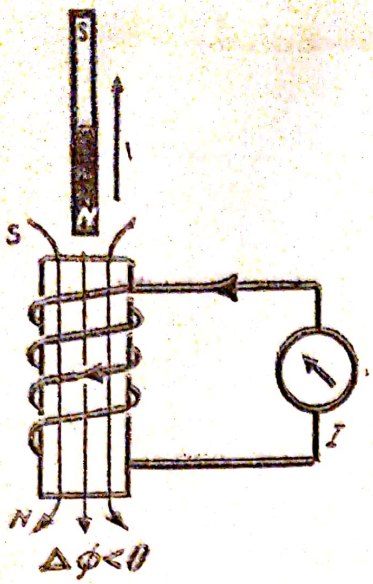


Fig. 4.6

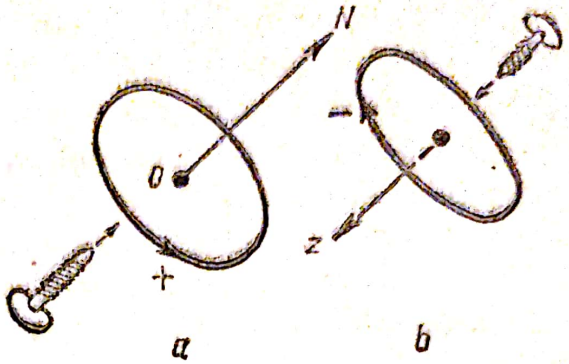


Fig. 4.7

Sensul t.e.m. induse mai poate fi stabilit folosind spira de arie orientată (fig. 4.7). Se alege sensul pozitiv de parcurgere a conturului spirei ca la § 3.4 (sensul pozitiv al normalei ON la spiră este acela în care se deplasează un burghiu drept, care se roteşte în sensul pozitiv de parcurs al spirei). T.e.m. şi curenţii induşi în spiră au sensul pozitiv dacă sensul lor coincide cu sensul pozitiv ales pe spiră şi au sensul negativ în caz contrar. Fluxul inductor prin circuitul spirei este pozitiv dacă are acelaşi sens cu normala la spiră.

Să considerăm un flux inductor Φ_d (fig. 4.8, *a*) de acelaşi sens cu normala la spiră, dar descrescător $\Delta\Phi < 0$. Legea inducţiei (1) duce la $e > 0$, de acelaşi sens cu sensul pozitiv pe spiră. Curentul indus este pozitiv, adică în sensul în care se roteşte şurubul pentru a se deplasa în sensul normalei N.

Curentul indus va produce o inducţie $\vec{B}_i$ de acelaşi sens cu fluxul inductor: fluxul indus se adună cu fluxul inductor şi se opune scăderii acestuia din urmă.

Dacă fluxul inductor creşte (fig. 4.8, *b*) lucrurile se petrec analog, dar în sens contrar.

4.4. Unitatea de flux magnetic. Din legea inducţiei electromagnetice (1) se deduce:

$$\Delta\Phi = -e\cdot\Delta t$$

cu ajutorul căreia se poate stabili unitatea de flux de inducţie:

$$\langle\Phi\rangle_{SI} = 1\text{V}\cdot 1\text{s} = \text{weber (Wb)}.$$

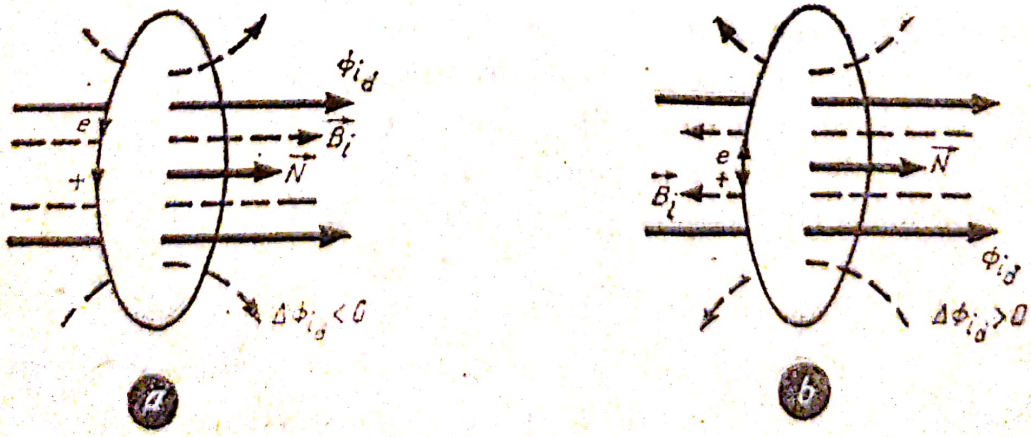


Fig. 4.8

Un weber este fluxul magnetic dintr-o spiră în care induce o t.e.m. de 1 volt, cînd scade uniform pînă la zero în timp de o secundă.

4.5. **Tensiunea indusă într-un conductor liniar.** Să studiem sub alt aspect inducția electromagnetică produsă într-un conductor liniar care taie liniile cîmpului magnetic.

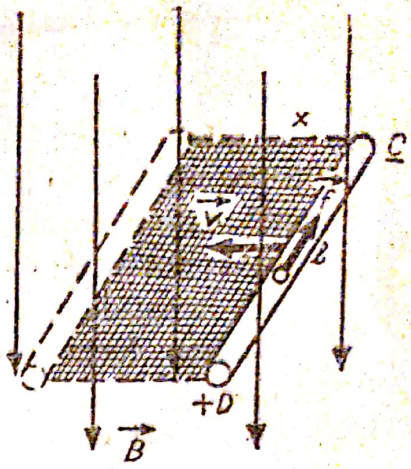


Fig. 4.9

Experiență. Între polii unui electromagnet puternic se mișcă brusc un conductor liniar, perpendicular pe direcția liniilor de forță. Capetele conductorului sînt conectate la bornele unui miliampermetru. La fiecare mișcare a conductorului acul instrumentului deviază într-un sens ori altul, dovedind că în conductorul l, care intersectează liniile cîmpului magnetic, se naște o t.e.m. indusă. Tensiunea electromotoare indusă este cu atît mai mare cu cît viteza conductorului este mai mare.

Fie conductorul liniar, de lungime l, așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic de inducție $\vec{B}$ (fig. 4.9.). Conductorul este mișcat cu viteza $\vec{v}$ constantă, de asemenea perpendiculară pe $\vec{B}$. Într-un interval de timp t conductorul se deplasează pe distanța $x = v \cdot t$, descriind o suprafață $S = l \cdot v \cdot t$. Conductorul va intersecta liniile de cîmp ce străbat această suprafață S, adică fluxul magnetic $\Phi = S \cdot B = B \cdot l \cdot v \cdot t$. Tensiunea indusă în conductor va fi:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -B \cdot l \cdot v, \qquad (2)$$

adică:

$$\boxed{e = -B \cdot l \cdot v.}$$

Cînd conductorul este deplasat de-a lungul liniilor cîmpului magnetic, nu se induce tensiune în el, deoarece nu sînt intersectate linii de cîmp. Dacă viteza $\vec{v}$ face unghiul α cu $\vec{B}$, atunci:

$$\boxed{e = -B \cdot l \cdot v \sin \alpha.} \qquad (3)$$

Aplicînd regula burghiului drept, cum s-a spus mai sus, se găsește sensul tensiunii induse ca în figura 4.9.

4.6. **Explicarea electronică a inducției electromagnetice.** Conductorul CD fiind deplasat cu viteza $\vec{v}$, perpendicular pe liniile cîmpului $\vec{B}$ (fig. 4.9), toți electronii din el se mișcă, în timpul deplasării conductorului, paralel cu viteza $\vec{v}$, ceea ce echivalează cu un curent electric I_1 îndreptat în sens opus deplasării electronilor.

Fiecare electron liber se găsește în cîmpul de inducție magnetică $\vec{B}$, încît asupra fiecărui electron acționează o forță lorentziană $\vec{f}$. Forța lorentziană, exercitată de cîmpul magnetic asupra fiecărui electron liber, produce o deplasare a electronilor liberi înspre capătul C al conductorului, ceea ce are ca urmare aglomerarea lor la acest capăt, care se încarcă negativ, capătul D încărcîndu-se pozitiv. Între cele două capete ale conductorului deplasat în cîmpul magnetic apare o t.e.m. Oprind conductorul, forța lorentziană dispare, de asemenea t.e.m. indusă. Deplasînd conductorul în sens contrar, forța lorentziană se inversează și de asemenea t.e.m. indusă are sens contrar. Dacă se unesc capetele conductorului t.e.m. indusă în conductor generează un curent de inducție prin circuit.

Deci apariția tensiunii are două cauze:

a) mișcarea conductorului în cîmpul de inducție $\vec{B}$ (forța lorentziană deplasează electronii);

b) variația lui $\vec{B}$ generează $\vec{E}$ variabil.

Autoinducție

4.7. Producerea fenomenului de autoinducție. Într-o spiră (indus), ia naștere curent indus atunci cînd variază fluxul magnetic prin suprafața delimitată de spiră. Fluxul variabil poate fi produs fie prin mișcarea relativă a unui magnet față de spiră, fie prin variația curentului dintr-un circuit vecin (inductor). El mai poate fi produs prin variația curentului electric din însăși spira indusă, care joacă astfel și rolul de inductor.

Experiență. O bobină B cu spire multe, aflată pe ramura unui miez de fier închis (fig. 4.10), se conectează la o sursă de curent continuu de 4—6 V, avînd în circuit beculețele B_1 și B_2, lampa cu neon N, întrerupătorul. La închiderea circuitului se constată că beculețul B_2 luminează întîi, iar B_1 puțin mai tîrziu. Lampa cu neon nu luminează, ca avînd nevoie de o tensiune de aprindere de cîteva zeci de volți. Se deșurubează beculețul B_2 (pentru a nu scurtcircuita lampa cu neon), apoi se închide circuitul. La deschiderea lui se constată o scurtă licărire a lămpii cu neon.

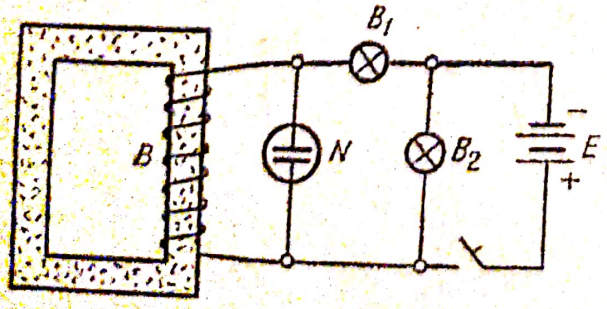


Fig. 4.10

La închiderea circuitului, curentul din bobină, deci și din beculețul B_1, crește de la zero pînă la o valoare maximă. Această creștere durează un scurt interval de timp; în acest timp fluxul magnetic din bobină crește și el de la zero la o va-

Scanned with OKEN Scanner

loare maximă corespunzătoare curentului electric. Această creștere a fluxului delimitat de bobină induce, tot în bobină, un curent, care se suprapune peste curentul principal. Prin bobină vor circula temporar doi curenți suprapuși: curentul principal, produs de sursa E, și *curentul autoindus*, produs de t.e.m., autoindusă în spiră. Potrivit legii lui Lenz curentul autoindus va avea sensul opus curentului principal, opunîndu-se creșterii curentului principal. De aceea, beculeţul B_1 luminează mai tîrziu decît B_2, prin care circulă curent ce nu trece prin bobină.

La întreruperea circuitului, curentul din bobină scade, ceea ce face să scadă fluxul magnetic din bobină. Se produce un curent autoindus, de același sens cu curentul principal, adică se va aduna cu el și se va opune scăderii curentului principal.

Tensiunea totală (a sursei plus cea autoindusă) va deveni atît de mare (un timp scurt) încît va „aprinde" becul cu neon. Fenomenul descris poartă numele de *autoinducție*.

- Autoinducția este inducția electromagnetică produsă într-un circuit datorită variației curentului care circulă prin acel circuit.

Autoinducția se produce nu numai la stabilirea sau întreruperea unui curent, ci ori de cîte ori variază intensitatea curentului electric din circuit.

4.8. **Inductanța unui circuit.** Curentul de intensitate I care circulă printr-un circuit generează în jurul său un cîmp magnetic de inducție $\vec{B}$, proporțional cu I. Ca urmare, circuitul va înconjura un flux de inducție propriu Φ, proporțional cu I:

$$\boxed{\Phi = LI.} \qquad (1)$$

Factorul de proporționalitate L se numește coeficient de inducție proprie sau *inductanță* a circuitului. Inductanța unui circuit este numeric egală cu fluxul produs prin suprafața circuitului cînd este parcurs de unitatea de intensitate $L = \frac{\Phi}{I}$, $I = 1$. Unitatea de inductanță se deduce din relația:

$$\langle L \rangle_{SI} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}},$$

care se numește henry*, cu simbol H. Un henry este inductanța unei spire în care ia naștere un flux magnetic propriu de 1 Wb, cînd spira este parcursă de 1A.

Inductanța unui solenoid se calculează în felul următor: fluxul printr-o spiră este $\Phi_1 = BS$, iar fluxul total:

$$\Phi = BNS = \mu \frac{N^2 SI}{l} = LI,$$

de unde:

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l}. \qquad (2)$$

* Denumire dată în cinstea fizicianului Henry Joseph (1797–1878).

4.9. **Legea autoinducției.** Deoarece autoinducția este un caz de inducție electromagnetică, legea ei se va deduce din:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -\Phi'(t),$$

de unde:

$$\boxed{e = -L\frac{di}{dt} = -Li'(t),} \qquad (3)$$

adică *tensiunea autoindusă într-un circuit este proporțională cu viteza de variație a curentului din acel circuit.*

Ori de cîte ori variază intensitatea curentului dintr-un circuit, se nasc în acesta curenți autoinduși, care se suprapun peste curentul din circuit (curentul principal); *curentul autoindus la închiderea circuitului, ori la creșterea curentului principal este de sens contrar lui. Curentul autoindus la întreruperea circuitului, ori la scăderea curentului principal este de același sens cu el* (conform regulii lui Lenz).

Explicarea energetică a autoinducției. O parte din energia furnizată de sursă la închiderea circuitului este disipată prin efect electrocaloric de către rezistența circuitului, iar cealaltă parte este înmagazinată de cîmpul magnetic al curentului. Datorită acestui fapt, curentul crește mai încet la închiderea circuitului ori la creșterea intensității. La întreruperea circuitului sau la scăderea intensității, dispare sau scade intensitatea cîmpului magnetic, de aceea el eliberează energia electromagnetică înmagazinată, ceea ce are ca urmare o prelungire a existenței curentului. Scînteia produsă la întreruperea unui circuit disipează această energie. În concluzie, *fenomenul de autoinducție se opune la orice variație a intensității curentului electric, adică se manifestă ca o inerție electromagnetică.*

4.10. **Rolul autoinducției în tehnică.** Deoarece t.e.m. autoindusă crește proporțional cu inductanța circuitului, un conductor sub forma unui fir întins va produce o autoinducție neglijabilă.

Dacă însă același fir este bobinat și mai ales dacă are și miez din fier, atunci firul are inductanța L mare, iar t.e.m. autoindusă va fi mare.

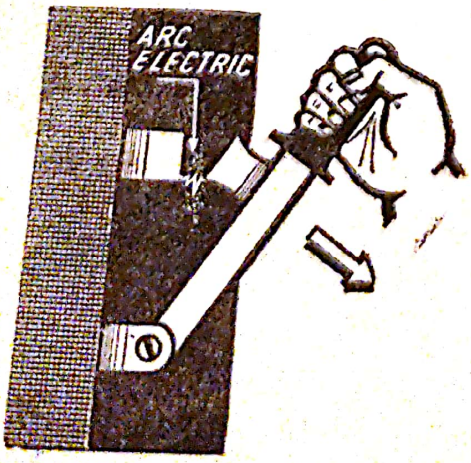


Fig. 4.11

Autoinducția prezintă o deosebită importanță în cazul curenților alternativi, deoarece cîmpul lor magnetic variază în orice moment. Proprietățile caracteristice curentului alternativ, care va fi studiat în capitolul următor, se datoresc în primul rînd autoinducției.

Între contactele unui întrerupător se produce un arc electric, datorită t.e.m. autoinduse la întreruperea circuitului. Așa se petrec lucrurile la întrerupătorul cu pîrghie (fig. 4.11), la tramvai cînd se depărtează troleul de linia de curent etc. Pentru a se evita topirea parțială și distrugerea pieselor între care se face contactul, se conectează un condensator paralel cu contactele întrerupătorului.

Scanned with OKEN Scanner

Condensatorul absoarbe energia eliberată de cîmpul magnetic prin curentul de autoinducție, încărcîndu-se. În practica electrotehnică este nevoie de rezistențe fără inductanță. De aceea înfășurarea unor asemenea rezistențe se face cu o sîrmă îndoită. Ambele jumătăți ale sîrmei sînt înfășurate una lîngă alta (fig. 4.12), încît sînt parcurse de curent în sensuri opuse, iar cîmpurile magnetice își anihilează reciproc acțiunea magnetică. O asemenea înfășurare se numește bifilară.

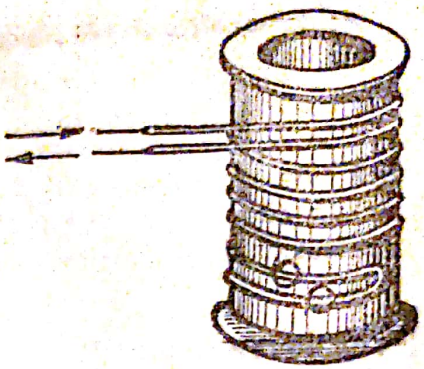


Fig. 4.12

4.11. Inductanța mutuală. Cuplajul bobinelor. Două circuite sînt cuplate dacă se poate transmite energie de la unul din ele la celălalt. Ele se pot cupla cu ajutorul rezistențelor, al condensatoarelor sau al bobinelor. În acest din urmă caz, fiecare bobină se găsește în cîmpul magnetic generat de cealaltă. Dacă toate liniile cîmpului unei bobine (1) străbat prin spirele celeilalte (2), cuplajul este maxim (fig. 4.13). În general, cînd majoritatea liniilor de cîmp sînt înlănțuite de ambele bobine, cuplajul se numește strîns; în caz contrar, cuplajul este slab. Variația curentului dintr-o bobină induce t.e.m. în a doua bobină: inducție mutuală (neglijînd autoinducția).

Fie Φ_{21} partea din fluxul Φ_1 generat de i_1, care străbate spira 2 (fig. 4.14). Acest flux Φ_{21} este proporțional cu i_1, care îl produce, depinzînd totodată de mediu, precum și de forma, dimensiunile și așezarea relativă a celor două spire 1 și 2; toți acești factori îi cuprindem în factorul de proporționalitate L_{21}, deci:

$$\Phi_{21} = L_{21} i_1.$$

Coeficientul L_{21} se numește *inductanță mutuală a celor două spire; el este numeric egal cu fluxul care înlănțuiește ambele spire, cînd este generat de un curent de 1 A*. În mod analog curentul i_2 va produce fluxul Φ_{12} înlănțuit de ambele spire 1 și 2:

$$\Phi_{12} = L_{12} i_2,$$

în care L_{12} are aceeași semnificație ca mai înainte.

Variația lui i_1 va induce în spira 2 o tensiune:

$$U_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21}\frac{di_1}{dt},$$

iar variatia curentului i_2 din spira 2 va induce în 1 tensiunea:

$$U_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12}\frac{di_2}{dt}.$$

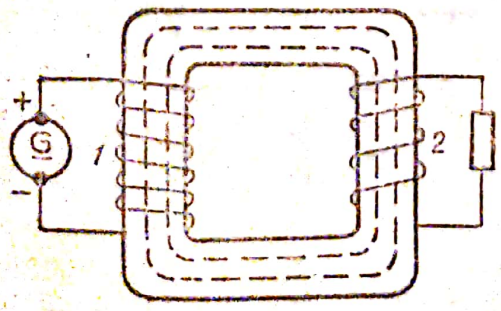


Fig. 4.13

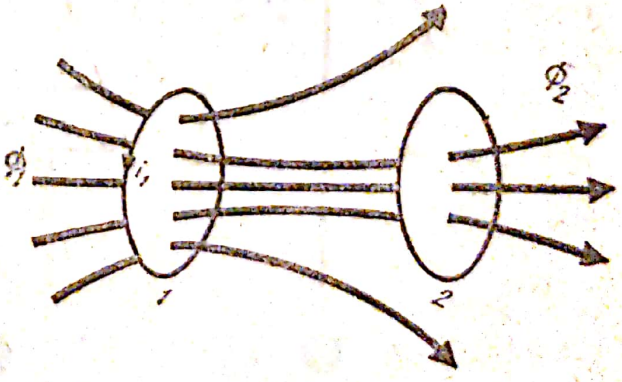


Fig. 4.14

Se demonstrează că:

$$\boxed{L_{21} = L_{12},} \qquad (4)$$

adică inductanța mutuală a două circuite este numeric egală cu fluxul generat de curentul din unul din circuite, care străbate și pe cel de-al doilea. La transformatoare (fig. 4.13) precum și în radiotehnică se folosește cuplajul bobinelor.

Probleme rezolvate

1. Explicarea unor fenomene fizice care au ca rezultat formularea regulei lui Lenz.

Rezolvare. Un circuit închis $ABCD$ (fig. 4.15, *a*) înconjură o suprafață, care-i intersectată de un flux magnetic inductor Φ. Sensul pozitiv pentru t.e.m. e și pentru curentul i se alege acela care este legat de sensul pozitiv al normalei N după regula burghiului drept. Fluxul $\Phi > 0$, deoarece coincide cu sensul normalei pozitive $+N$.

Dacă fluxul inductor crește, atunci viteza lui de variație este pozitivă $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ și ca urmare (fig. 4.15, *b*) t.e.m indusă e, ca și curentul indus i, sînt negativi $e < 0$: vor avea sensul opus celui ales ca pozitiv. De ce? Curentul indus $i < 0$ creează un al doilea flux, fluxul indus Φ_i, care are sensul opus lui Φ, deci $\Phi_i < 0$. Fluxul indus se opune creșterii lui Φ. Totodată, laturile care formează circuitul parcurs de curentul indus sînt acționate de forțe electromagnetice F_1, F_2, F_3, F_4, care au ca efect micșorarea suprafeței intersectată de fluxul inductor Φ și ca urmare duc la micșorarea lui Φ, adică se opun creșterii lui Φ_i.

Dacă fluxul inductor scade, atunci viteza lui de variație este negativă $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ (fig. 4.15, *c*) și, ca urmare, t.e.m. indusă e — ca și curentul indus i — sînt pozitivi $e > 0$. Vor avea deci sensul la fel cu cel ales pozitiv. Curentul indus $i > 0$ creează fluxul indus Φ_i care are sensul la fel cu Φ, deci $\Phi_i > 0$. Fluxul indus se opune scăderii lui Φ. Totodată, laturile care formează circuitul parcurs de curentul indus sînt acționate de forțe electromagnetice F'_1, F'_2, F'_3, F'_4, care au ca efect mărirea suprafeței intersectată de fluxul inductor Φ și, ca urmare, duc la mărirea lui Φ, adică se opun creșterii lui Φ_i.

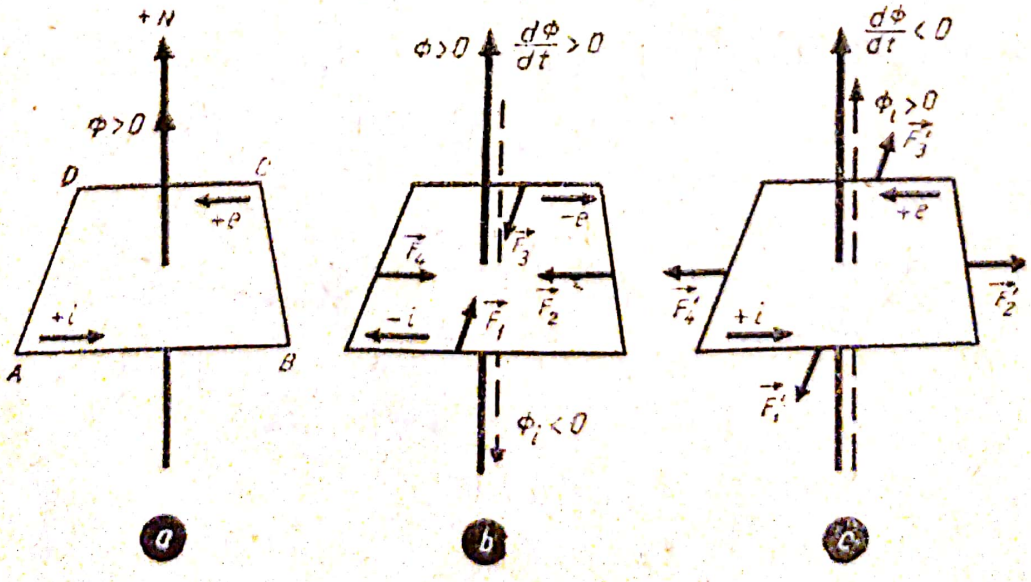


Fig. 4.15

2. Un cadru pătrat, cu latura de 20 cm și 10 spire, are capetele legate la 2 inele de cupru izolate unul de altul. Sistemul format din cadru și inele se poate roti în jurul unei axe din planul cadrului, paralelă cu o latură și trecînd prin centru (fig. 4.16, *a*). Cadrul se rotește uniform, cu 3 000 de ture pe minut, într-un cîmp uniform de inducție $B = 0{,}2$ T. Pe inelele A și B apasă două contacte, unite printr-un fir de 4 Ω. Cadrul are rezistența de 1 Ω. Se cer: *a)* expresia fluxului magnetic limitat de aria cadrului la un moment dat și reprezentarea lui grafică;

b) expresia t.e.m. induse în cadru și reprezentarea ei grafică;

c) expresia curentului prin rezistența R și variația ei în timp.

Se neglijează efectele de autoinducție.

Rezolvare. a) fluxul de inducție $\Phi = B_n NS$ adică:

$$\Phi = BNS \cos \omega t = 0{,}2 \cdot 10 \cdot 0{,}04 \cos 2\pi \cdot \frac{3\,000}{60} t;$$

deci fluxul la un moment dat are expresia:

$$\Phi = 8 \cdot 10^{-2} \cos 100\,\pi t.$$

reprezentată grafic în figura 4.16, *b*.

b) T.e.m. indusă va fi:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi'(t) = BNS\,\omega \sin \omega t,$$

adică t.e.m. indusă la un moment dat are expresia:

$$e = BNS\omega \sin \omega t = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 100\pi \sin 100\,\pi t,$$

$$e = 8\pi \sin 100\,\pi t,$$

reprezentată grafic pe figura 4.16, *b*.

c) curentul din circuit va avea expresia:

$$i = \frac{e}{R + r} = \frac{BNS\,\omega \sin \omega t}{R + r} = 1{,}6\pi \sin 100\,\pi t,$$

reprezentată grafic pe figura 4.16, *b*.

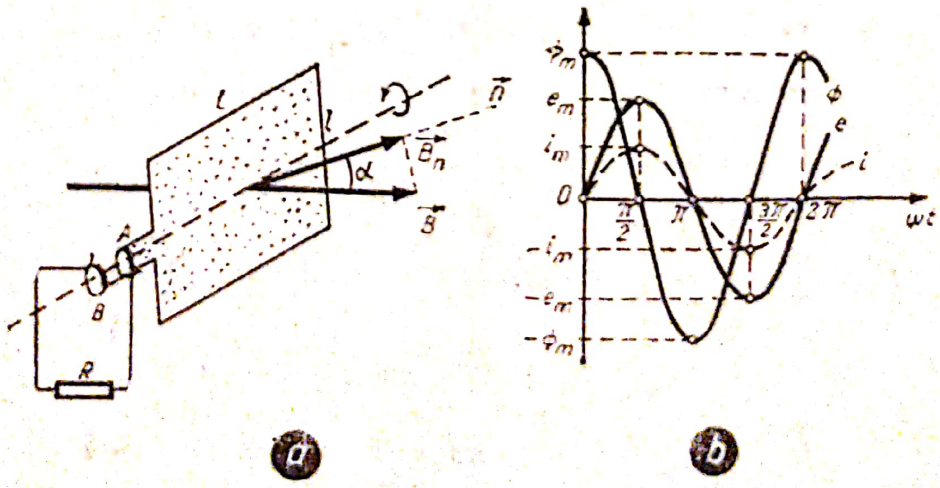


Fig. 4.16

Întrebări, exerciţii, probleme

1. De ce se îngrămădesc electronii liberi la capătul unui conductor care se mişcă într-un cîmp magnetic? Se poate întîmpla să nu se îngrămădească? În ce caz?

2. Ce transformare de energie se produce la mişcarea unui conductor într-un cîmp magnetic sub acţiunea unei forţe exterioare?

3. Ce rol are cîmpul magnetic în transformarea de energie mecanică în electromagnetică sau invers?

4. Siguranţele radioreceptoarelor sau ale televizoarelor se topesc mai ales la începutul ori la întreruperea audiţiei. De ce?

5. Să se stabilească sensul curentului indus într-un conductor aşezat perpendicular pe planul figurii şi care este mişcat în cîmpul magnetic, aşa cum se vede în figura 4.17. Conductorul este aşezat perpendicular pe planul hîrtiei şi este reprezentat printr-un mic cerculeţ.

6. Între polii unui electromagnet cu secţiunea de 16 cm^2 se creează un flux magnetic de $4 \cdot 10^{-3}$ Wb. Perpendicular pe direcţia cîmpului se deplasează un conductor lung de 0,4 m, cu viteza de 2 m/s. Care este t.e.m. indusă în conductor? Ce curent va circula prin el, dacă se închide circuitul printr-un fir cu rezistenţă de 2 Ω?

Răspuns: 2 V; 1 A.

7. Într-un conductor cu lungimea de 0,5 m, care se deplasează cu 1 m/s perpendicular pe liniile cîmpului, se induce o t.e.m. de 2 V. Care este inducţia magnetică?

Răspuns: 4 tesla.

8. Un conductor rectiliniu de 10 cm lungime se deplasează cu viteza de 1 m/s, perpendicular pe liniile cîmpului magnetic, a cărui inducţie este 1 tesla. Care este t.e.m. indusă? Dar în cazul cînd viteza este paralelă cu liniile cîmpului? Dar cînd face 30° cu liniile cîmpului magnetic?

Răspuns: 0,1 V; 0; 0,05 V.

9. O bobină cu 100 de spire este aşezată cu axa paralel cu liniile cîmpului magnetic care are $\frac{10^7}{4\pi} \frac{A}{m}$. În ce interval de timp trebuie scoasă bobina din cîmp pentru a induce în ea t.e.m. de 5 V? Diametrul bobinei este de 5 cm.

Răspuns: ≈ 0,04 s.

10. Barele de cupru, care constituie partea activă a înfăşurării induse dintr-un dinam, au lungimea de 0,5 m şi se rotesc cu viteza periferică de $20 \frac{m}{s}$ în întreferul unui electromagnet, unde inducţia are valoarea de 1T. Ce tensiune se induce într-o bară?

Răspuns: 10 V.

11. Într-un cîmp magnetic uniform cu inducţia de 10^{-2}T se introduce, în 0,5 s, o bobină cu 10^3 spire, avînd raza de 5 cm. Bobina este adusă cu axa paralelă cu liniile cîmpului şi are legat între capete un fir cu rezistenţa de 50 Ω. Să se cer t.e.m. indusă şi curentul indus mediu.

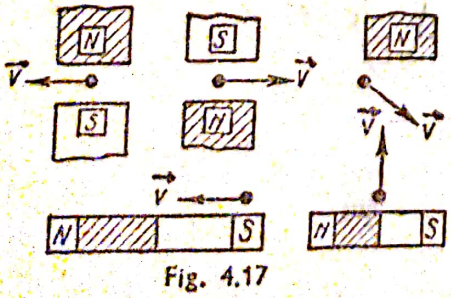


Fig. 4.17

Răspuns: 50 π mV; ≈ π mA.

12. O bobină cu inductanţa de 0,38 H este parcursă de un curent care variază sinusoidal, avînd frecvenţa de 12 Hz şi amplitudinea curentului de 4 A. Care-i expresia t.e.m. autoindusă în bobină? Să se reprezinte grafic.

Răspuns: $e = -114{,}55 \cos 24\pi \cdot t$ volţi.

Scanned with OKEN Scanner

13. Să se calculeze inductanța unei bobine cu 500 de spire pe 49 cm lungime, știind că diametrul ei mediu este de 14 cm.

Răspuns: ≈ 10 mH.

14. Un cadru dreptunghiular cu aria de 300 cm² se rotește uniform într-un cîmp magnetic uniform cu intensitatea de $200 \frac{A}{m}$. Rotația se face cu $628 \frac{rad}{s}$ în jurul unui ax perpendicular pe liniile cîmpului și care trece prin centrul cadrului, paralel cu o latură a lui. Să se reprezinte grafic variația fluxului și t.e.m. induse, în raport cu timpul.

15. Să se calculeze inductanța unei bobine toroidale cu secțiunea de 6 cm², raza medie de 10 cm, avînd 500 de spire.

Răspuns: 0,3 mH.

Scanned with OKEN Scanner

5. Curent alternativ

A. Tensiuni electromotoare alternative

5.1. Producerea t.e.m. alternative. În electrotehnică este mai puțin folosit curentul continuu. Cea mai largă întrebuințare o are curentul alternativ, care poate fi ușor produs, ușor transportat la distanță și, de asemenea, cu ușurință folosit. Obținerea curentului alternativ se bazează pe fenomenul inducției electromagnetice. Acest fenomen permite obținerea de t.e.m. variabile. *Dacă variația t.e.m. este sinusoidală curentul se numește alternativ sinusoidal. T.e.m. alternativă se poate obține pe două căi: rotirea uniformă a unei spire într-un cîmp magnetic uniform sau prin rotirea unui magnet (cîmp magnetic) în fața unei bobine fixe.*

a) O spiră metalică este rotită uniform în jurul axei AB (fig. 5.1) într-un cîmp magnetic produs de un electromagnet NS. Capetele spirei sînt conectate la două inele C și D, care pot aluneca sub periile P_1 și P_2. Un rezistor R închide circuitul exterior prin perii. Din cauza rotirii spirei, fluxul de inducție care o străbate variază în fiecare moment, ceea ce face să apară în ea o t.e.m. de inducție, alternativă sinusoidală. Acul unui instrument de măsurat care ar fi introdus în circuit în serie cu rezistorul ar oscila de o parte și de alta a poziției zero, indicînd existența unui curent alternativ. Să analizăm mai de aproape acest fenomen. În poziția *a* (fig. 5.2) planul spirei este perpendicular pe liniile de cîmp, normala $\vec{n}$ la fața

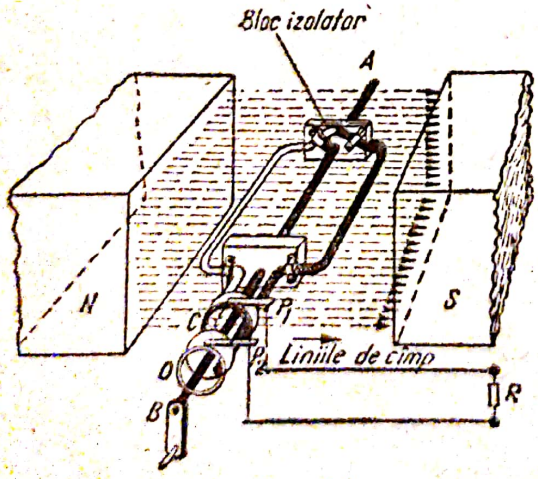


Fig. 5.1

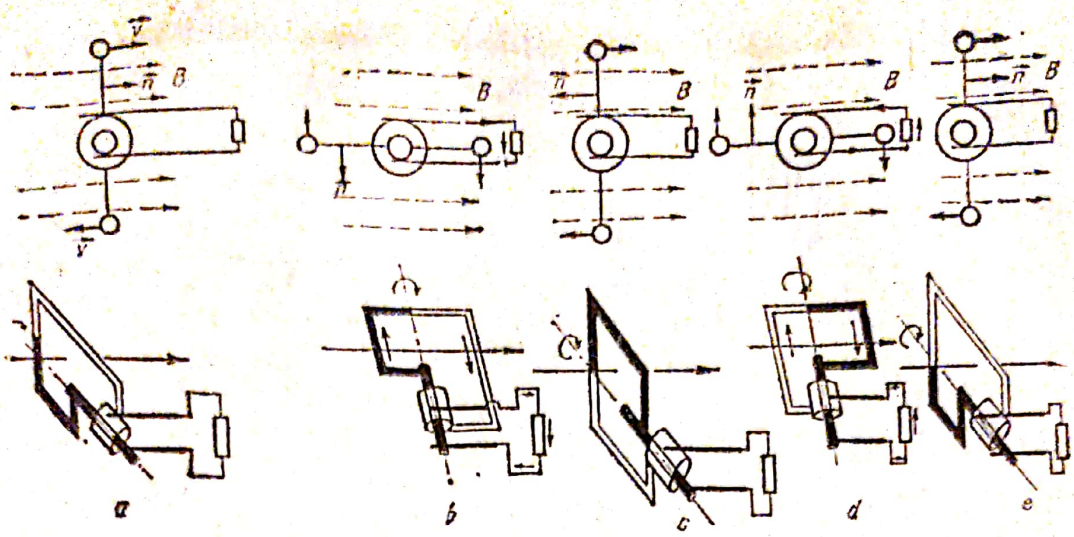


Fig. 5.2

spirei face unghiul $\alpha = 0$ cu liniile cîmpului; într-un interval de timp dt foarte mic, laturile orizontale ale spirei se mișcă foarte puțin, dar în această poziție nu taie liniile cîmpului. În acest interval de timp, variația fluxului $d\Phi$ este nulă, deci în spiră nu se induce t.e.m. Pe măsură ce spira se rotește, laturile ei încep să taie linii de cîmp din ce în ce mai multe în unitatea de timp, în spiră se generează t.e.m. din ce în ce mai mare, atingînd valoarea maximă E_m, cînd planul spirei devine paralel cu liniile de cîmp, iar normala $\vec{n}$ face unghiul $\alpha = \frac{\pi}{2}$ cu liniile cîmpului. În această poziție b valoarea fluxului este nulă, dar variația lui are valoarea maximă, deoarece laturile spirei taie cele mai multe linii de cîmp în unitatea de timp. Tensiunea indusă are sensul spre noi în latura din dreapta, de la noi spre figură în latura din stînga. Continuînd rotirea din poziția b către poziția c, laturile spirei taie mereu mai puține linii în unitatea de timp, t.e.m. indusă scade treptat, iar în poziția c a spirei, cînd $\alpha = \pi$, devine nulă. Spira își continuă rotirea din poziția c spre d apoi spre e; fenomenele se succed la fel ca mai înainte, în ceea ce privește valoarea numerică, dar sensul este opus, deoarece liniile cîmpului intră pe cealaltă față a spirei. Cînd spira a ajuns în poziția e, ea repetă poziția din a etc. Variațiile succesive ale t.e.m. sînt arătate de curba sinusoidală din figura 5.5. Se observă că t.e.m. indusă are succesiv valori într-un sens, apoi în sens opus: este o t.e.m. alternativă.

Deoarece spira se rotește uniform cu viteza unghiulară ω, considerînd ca moment inițial, momentul în care spira s-a aflat în poziția a, $\alpha = \omega t$ este unghiul făcut de normala $\vec{n}$ la fața spirei cu liniile cîmpului la momentul t. Fluxul de inducție prin aria spirei la momentul dat t este: $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, unde $\Phi_m = BS$ este valoarea maximă a fluxului (cînd $\alpha = 0$). T.e.m. indusă în spiră va fi dată de legea inducției electromagnetice:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t.$$

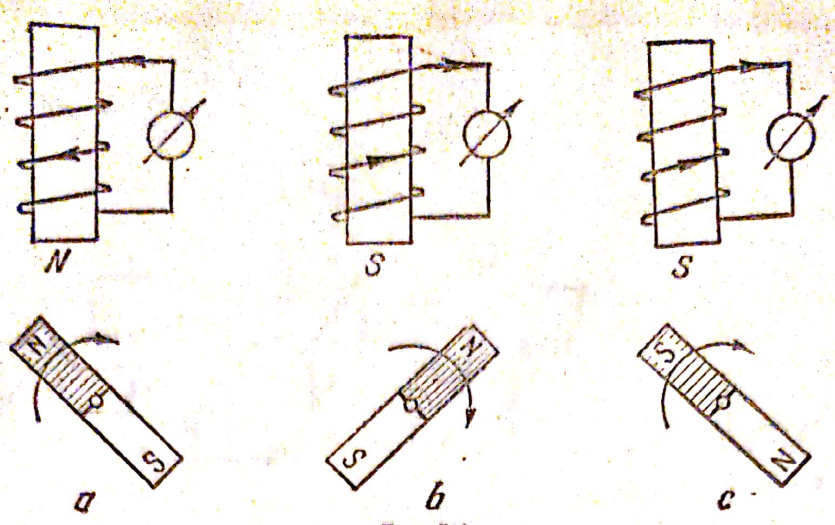


Fig. 5.3

Notînd *valoarea maximă a t.e.m. indusă*, cu $E_m = \omega\Phi_m$, atunci valoarea instantanee e a tensiunii va fi:

$$\boxed{e = E_m \sin \omega t.} \tag{1}$$

Dacă circuitul exterior este închis printr-o sîrmă fără înfăşurări, se va produce un curent alternativ sinusoidal, a cărui intensitate va fi:

$$\boxed{i = I_m \sin \omega t,} \tag{2}$$

unde I_m este valoarea maximă a intensităţii curentului alternativ, sinusoidal. Aşadar, *în curentul alternativ sinusoidal, tensiunea şi intensitatea variază sinusoidal în raport cu timpul. Ele trec prin aceleaşi valori şi în acelaşi sens la intervale egale de timp T, numite perioade.*

Perioada şi frecvenţa sînt mărimi inverse una alteia.

b) Prin rotirea unui magnet în faţa unei bobine se poate obţine, de asemenea, tensiune alternativă sinusoidală, după montajul din figura 5.3. Sub o bobină cu miez de fier se roteşte un magnet bară, în jurul unui ax orizontal. Instrumentul de măsurat indică producerea în bobină a unui curent alternativ. Bobina este străbătută în fiecare moment de un flux de inducţie variabil, care induce în bobină o t.e.m. alternativă.

Variaţia sinusoidală a curentului alternativ se poate demonstra experimental cu ajutorul osciloscopului magnetic. El constă dintr-o buclă metalică B (fig. 5.4) pe care este fixată o mică oglindă O. Bucla cu oglindă se află între polii unui magnet puternic. Pe O cade un fascicul de lumină produs de lampa L_1, concentrat de un condensor, apoi limitat de fanta circulară F. Cu lentila L, avînd distanţa focală de 10...15 cm, se proiectează imaginea fantei F pe ecran, după reflectarea pe O şi pe oglinda rotitoare R. T.e.m. alternativă generată de spira rotitoare (fig. 5.1) sau de bobina din figura 5.3 este adusă la bornele B_1B_2 de la care se alimentează bucla osci-

Scanned with OKEN Scanner

oscopului magnetic. Firele buclei fiind parcurse de curent alternativ și aflîndu-se în cîmpul magnetului vor fi deviate alternativ de forțele electromagnetice. Oglinda O va oscila în jurul unui ax paralel cu firele. Oglinda rotitoare este rotită în jurul unui ax perpendicular pe firele buclei și ca urmare, pe ecranul E apare o sinusoidă luminoasă.

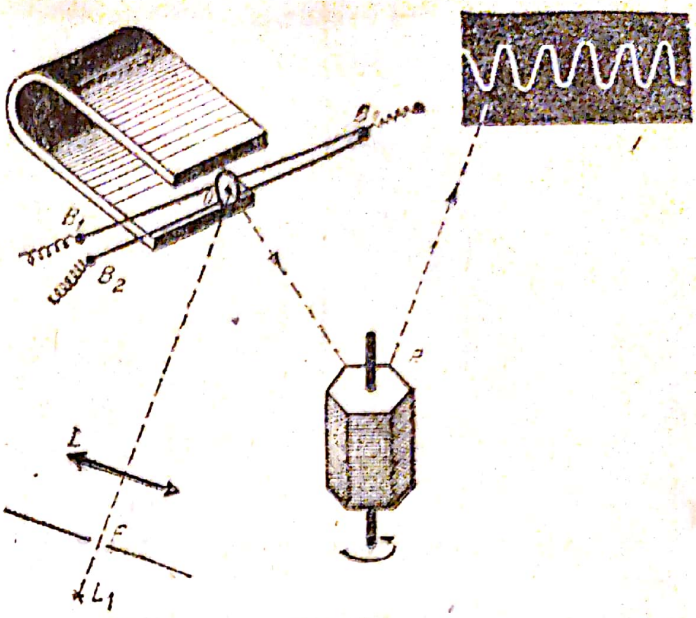


Fig. 5.4

5.2. Caracteristicile mărimilor alternative sinusoidale. S-a arătat că tensiunea alternativă (intensitatea) este o funcție sinusoidală de timp (formulele (1), (2)). Ea se va reprezenta grafic printr-o sinusoidă (fig. 5.5) înscriind pe abscisă timpul, iar pe ordonată valorile instantanee ale tensiunii (intensității). După cum se știe, orice mărime sinusoidală este caracterizată prin: *amplitudine* și *elongație*, *perioadă* și *frecvență*, *fază**.

După cum se observă funcția $e = E_m \sin \omega t$ este periodică. Fie T intervalul de timp după care funcția ia aceeași valoare. În acest interval de timp argumentul a crescut cu 2π. Deci, $E_m \sin \omega(t+T) = E_m \sin (\omega t + 2\pi)$, de unde se deduce: $\omega t + \omega T = \omega t + 2\pi$, sau $\omega T = 2\pi$, și

$$\boxed{T = \frac{2\pi}{\omega},} \qquad (3)$$

adică după un interval de timp t egal cu această valoare, tensiunea (intensitatea curentului alternativ sinusoidal) trece prin aceeași valoare: T se numește *perioadă*.

Amplitudinea este valoarea maximă E_m a tensiunii (I_m, pentru intensitate). Amplitudinea este o mărime esențialmente pozitivă. Elongația sau valoarea instantanee este valoarea tensiunii e sau u (a intensității i) la un moment dat t; ea poate lua valorile: $e \in (-E_m, E_m)$.

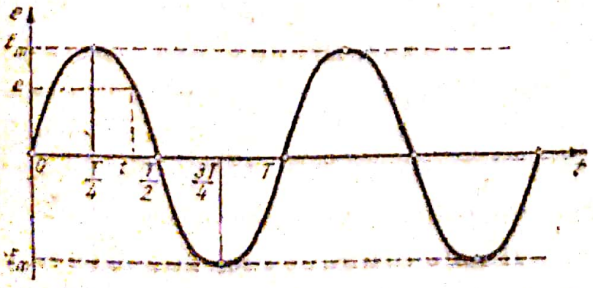


Fig. 5.5

Perioada T și frecvența ν. Perioada se măsoară în secunde. Raportul între numărul de perioade (N) și intervalul de timp corespunzător Δt se numește frecvență (ν). Deci: $\frac{N}{\Delta t} = \nu$. De aici se

* V. Manualul de Fizică pentru anul II, secția reală.

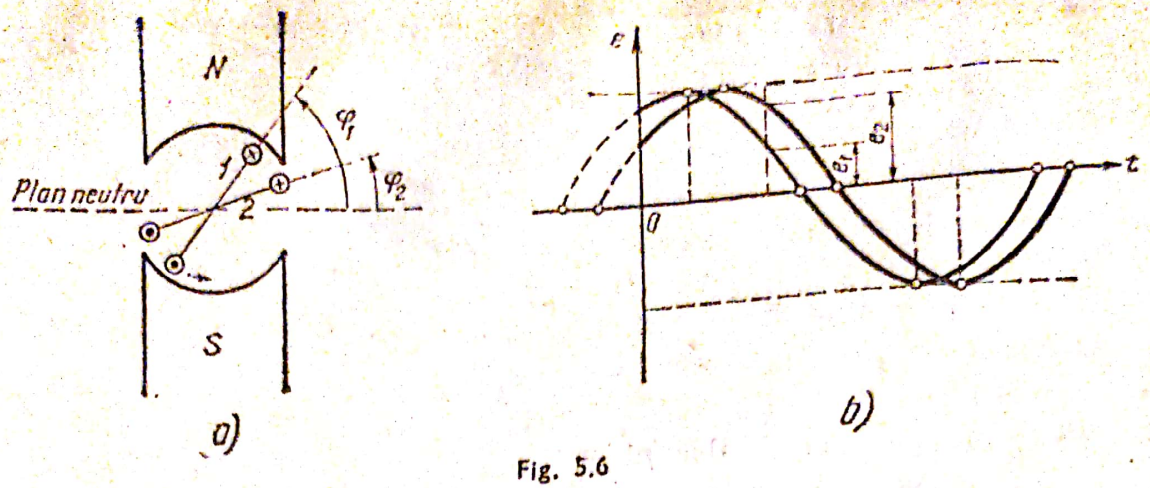


Fig. 5.6

vede că frecvența este numeric egală cu numărul de perioade în unitatea de timp:

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (4)$$

Frecvența se măsoară în herți* (Hz sau s^{-1}). Un hertz este frecvența unui curent alternativ cu perioada de o secundă. Curentul alternativ industrial are frecvența standardizată la 50 Hz, deci are perioada $T = 2 \cdot 10^{-2}$ s. În radiotehnică se folosesc curenți cu frecvența de ordinul sutelor de kHz, iar în televiziune, de ordinul de mărime al sutelor de MHz.

Mărimea $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ [relațiile (3) și (4)] se numește *pulsație* și reprezintă numărul de perioade efectuate în 2π unități de timp (secunde).

Faza tensiunii (intensității) este reprezentată prin valoarea argumentului sinusului din expresia tensiunii (intensității) — formulele (1) și (2) — la un moment dat. Fie două spire rotitoare *1* și *2* (fig. 5.6, *a*) așezate coaxial, așa fel ca la momentul inițial $t = 0$, planul celei dintîi să facă unghiul φ_1 cu planul neutru (planul de referință), iar planul celei de-a doua să facă unghiul φ_2 cu același plan neutru. Aceste două unghiuri φ_1 și φ_2 determină fazele inițiale ale tensiunilor. Dacă spirele se rotesc solidar, cu viteza unghiulară constantă ω, în sens antiorar, în fiecare spiră se va genera cîte o t.e.m. sinusoidală. Aceste tensiuni au aceeași valoare maximă E_m, aceeași perioadă T, dar se deosebesc prin fază. Ele nu trec în același moment prin valoarea maximă ori prin valoarea nulă. Tensiunea din spira *1* va avea la momentul t valoarea $e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1)$, iar tensiunea din spira *2* va avea, în același moment, valoarea $e_2 = E_m \sin(\omega t + \varphi_2)$. Diagramele lor se văd în figura 5.6, *b*. Se observă că, la momentul t, tensiunile e_1 și e_2 se deosebesc numai prin fază; prima are faza $\omega t + \varphi_1$, a doua are faza $\omega t + \varphi_2$. Cele două tensiuni sînt defazate una față de alta. Prima tensiune e_1 ajunge la valoarea maximă înaintea celei de-a doua e_2: este defazată

* După numele fizicianului Heinrich Hertz (1857—1894)

în avans cu $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ față de e_2, iar e_2 este defazată în urma lui e_1 cu aceeași diferență de fază φ. Diferența de fază se mai numește și defazaj.

Problemă rezolvată. Se dau două tensiuni alternative:

$$e_1 = 220 \sin\left(314\ t + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$e_2 = 220 \sin\left(314\ t + \frac{\pi}{12}\right).$$

Se cer: valoarea maximă a tensiunilor, perioada și frecvența lor, pulsația, fazele inițiale, diferența lor de fază și timpul corespunzător diferenței lor de fază.

Rezolvare. Din ecuația (1), se deduce:

$$E_m = 220 \text{ volți:}$$

$$\omega t = 314\ t = 100\,\pi t \Rightarrow \frac{2\pi}{T} = 100\pi \Rightarrow T = \frac{1}{50} \text{ s},$$

iar $\nu = \frac{1}{T} = 50$ Hz.

Pulsația va fi: $\omega = 2\pi\nu = 314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Fazele inițiale vor fi, dacă se face $t = 0$ în expresiile lui e_1 și e_2:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{4} \text{ rad} \text{ și } \varphi_2 = \frac{\pi}{12} \text{ rad.}$$

Diferența de fază va fi: $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{12} = \frac{\pi}{6}$, adică $\varphi = 30°$. Pentru a calcula timpul corespunzător fazelor inițiale, se ține seamă că unghiul $\frac{\pi}{4}$ trebuie să fie omogen cu ωt, adică $\omega t_1 = \frac{\pi}{4} \Rightarrow t_1 = \frac{\pi}{4\omega} = \frac{\pi}{4 \cdot 2\pi\nu} = \frac{1}{400} = 0{,}0025$ s și analog:

$$t_2 = \frac{\pi}{12\omega} = \frac{\pi}{12 \cdot 2\pi\nu} = \frac{1}{1\ 200} = 0{,}000833 \text{ s.}$$

Atunci timpul de defazare va fi:

$$t = t_1 - t_2 = 0{,}001667 \text{ s.}$$

5.3. Moduri de reprezentare ale mărimilor alternative. Mărimile alternative tensiune și intensitate, se pot reprezenta în trei moduri: analitic, prin formule ca (1) și (2), grafic, prin sinusoide ca în figura 5.5 și prin *fazori*.

Reprezentarea analitică pune în evidență valoarea maximă, faza, pulsația, faza inițială și valoarea instantanee a mărimii respective. Are dezavantajul că nu dă o imagine a acestor mărimi.

Reprezentarea grafică este mai intuitivă. Pe ordonată se reprezintă valorile instantanee ale mărimii — u sau i — la o scară convenabil aleasă. Pe abscisă se reprezintă valorile timpului față de origine. Prin reprezentarea grafică se pun în evidență valoarea maximă, faza inițială, perioada și valoarea instantanee.

Scanned with OKEN Scanner

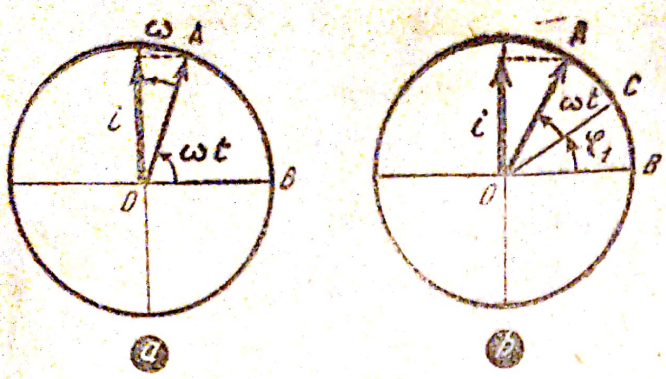


Fig. 5.7

Reprezentarea prin fazori este mai simplă, mai intuitivă și permite calcule relativ simple cu mărimile sinusoidale.

Fazorul este un vector rotitor. El este determinat prin: lungime (valoare numerică), unitatea de măsură și unghiul de fază. Lungimea fazorului este egală, la scara aleasă (pentru unitate), cu valoarea maximă, ori cu valoarea efectivă a mărimii alternative care se reprezintă (fig. 5.7.).

Unitatea aleasă se menționează pe grafic: de exemplu 1 cm corespunde la 0,5 *A* sau la 100 V.

Fazorul se rotește în jurul originii *O* în sens antiorar, cu viteza unghiulară constantă, egală cu pulsația ω a mărimii alternative. Unghiul de fază este unghiul făcut de fazor cu axa absciselor. Proiecția fazorului pe ordonată dă, în fiecare moment, valoarea instantanee a mărimii alternative reprezentate. De exemplu, intensitatea *i* a curentului alternativ, dată de formula (2), se reprezintă fazorial ca în figura 5.7, *a*. La momentul inițial fazorul ocupa poziția *OB*, cu faza inițială nulă. Dacă intensitatea *i* are faza inițială $\varphi_1 \neq 0$, ea se exprimă analitic prin $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_1)$.

Reprezentarea ei fazorială este în figura 5.7, *b*. Fazorul de lungime I_m ocupa inițial poziția *OC*, cu faza inițială φ_1. La momentul *t*, fazorul trece prin poziția *OA*, avînd faza $\omega t + \varphi_1$; valoarea instantanee *i* se obține proiectînd fazorul pe ordonată. Unghiul dintre doi fazori, care reprezintă mărimi alternative de aceeași frecvență, dar de faze diferite, reprezintă diferența de fază a celor două mărimi alternative.

5.4. Efectele curentului alternativ. Curentul alternativ are aceleași efecte ca și cel continuu: electrocaloric, electrochimic și electromagnetic. Unele din ele însă depind de sensul curentului și de aceea capătă aspecte deosebite față de aceleași efecte în curentul continuu.

Efectul electrocaloric sau Joule se manifestă la fel ca și la curentul continuu, deoarece dezvoltarea de căldură nu depinde de sensul curentului: $Q = RI^2t$; pentru calcularea cantității de căldură degajată de curentul electric se folosește aceeași formulă în curentul alternativ ca și în cel continuu, unde *I* este intensitatea efectivă.

Efectul electrochimic depinde de sensul curentului; la catod se depun cationii, la anod se depun anionii. De aceea nu se poate face electroliza cu curent alternativ. De exemplu, în cazul apei s-ar obține la fiecare electrod cîte un amestec de un volum oxigen și două volume hidrogen.

Efectul electromagnetic, de asemenea, depinde de sensul curentului. De aceea, un conductor prin care circulă curent alternativ generează în jurul său cîmp magnetic, care are liniile de aceeași formă ca în cazul curentului continuu, dar în fiecare punct modulul inducției magnetice, *B*, variază sinusoidal în funcție de timp. Din cauza inerției, acul magnetic nu poate urmări aceste variații rapide și deci nu dovidește în cîmpul magnetic alternativ. Se poate dovedi experimental existența cîmpului magnetic alternativ prin experiența lui Thomson. Se așază pe masă o bobină,

în care se introduce un miez de fier vertical, care iese din bobină. În timp ce bobina este alimentată cu curent alternativ, este introdusă într-un cadru de mai multe spire, avînd în serie un beculeț: acesta luminează, dovedind producerea unui fenomen de inducție electromagnetică, produs de cîmpul magnetic alternativ. Repetînd experiența cu curent continuu, beculețul nu luminează. În locul spirei cu beculeț se poate folosi un inel din fier. Lăsîndu-l să cadă în jurul miezului, el este azvîrlit cu putere în sus. Cauza este tot fenomenul de inducție electromagnetică și manifestarea regulii lui Lenz.

5.5. **Valori instantanee, maxime și efective ale curentului alternativ.** În paragrafele anterioare s-a arătat ce sînt valorile instantanee și valorile maxime ale tensiunii și intensității la curentul alternativ sinusoidal. În electrotehnică se mai folosesc două valori ale acestor mărimi: *valoarea medie* și *valoarea efectivă*.

Importanță practică prezintă valorile efective E (U), I ale tensiunii și intensității. Acestea sînt valorile indicate de instrumentele de măsurat. Valoarea efectivă a intensității se definește pe baza efectului electrocaloric, deoarece dezvoltarea de căldură nu depinde de sensul curentului electric.

- Valoarea efectivă (I) a intensității curentului alternativ este egală cu intensitatea unui curent continuu, care dezvoltă aceeași cantitate de căldură ca și curentul alternativ, trecînd prin același rezistor (cu aceeași rezistență), în același interval de timp.

Ea este dată de formula:

$$\boxed{I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707 \; I_m,}$$

în mod analog tensiunea efectivă U sau E va fi:

$$\boxed{U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707 \; U_m.}$$

Aceste relații se pot justifica destul de ușor. Printr-un rezistor de rezistență R circulă un curent alternativ $i = I_m \sin \omega t$, care produce într-un timp foarte mic dt, o variație a energiei interne a conductorului $dW = Ri^2dt = RI_m^2 \sin^2 \omega t \, dt$. Dar se știe că $\cos 2\omega t = \cos^2\omega t - \sin^2\omega t$

$$\Rightarrow \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \text{ încît:}$$

$$dW = RI_m^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \right) dt$$

sau

$$\frac{dW}{dt} = W'(t) = \frac{RI_m^2}{2} (1 - \cos 2\omega t).$$

Dar funcția $W(t)$ care prin derivare dă membrul doi al ecuației este:

$$W(t) = \frac{RI_m^2}{2} \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) + C.$$

Pentru o perioadă, variația energiei interne (cantitatea de căldură) dezvoltată va fi diferența între valoarea energiei la momentul T și respectiv la momentul inițial ($t = 0$). Înlocuind în expresia de mai sus, se obține:

$$\Delta W = W - W_0 = \frac{RI_m^2 T}{2}.$$

În același interval de timp T, datorită aceleiași rezistențe R la trecerea unui curent continuu de intensitate I, energia internă va varia cu:

$$\Delta W = RI^2T.$$

Se deduce succesiv:

$$RI^2T = \frac{RI_m^2 T}{2},$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

cum s-a arătat mai înainte.

B. Circuite în curent alternativ

5.6. Rezistor în curent alternativ. Un circuit electric poate conține următoarele trei elemente: un rezistor cu rezistența R, o bobină cu inductanța L, un condensator cu capacitatea C. Pot fi circuite care conțin numai unul din acești parametri: R, L sau C. De exemplu, un circuit format din: un bec electric, un reșou, un reostat, poate fi socotit ca circuit având numai rezistența R, deoarece influențele inductanței sau capacității lui sînt neînsemnate și pot fi neglijate. Un cablu care lucrează în gol poate fi considerat ca o capacitate, deoarece rezistența și inductanța lui au influență neglijabilă. În cazul circuitului unui transformator neîncărcat se pot neglija rezistența și capacitatea, considerînd circuitul numai cu inductanță.

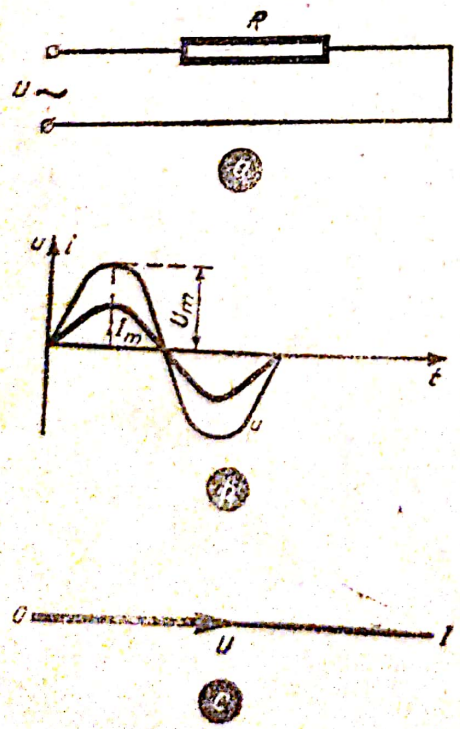


Fig. 5.8

Să considerăm un circuit de curent alternativ cu rezistență R (fig. 5.8, *a*). La bornele lui se conectează o tensiune alternativă $u = U_m \sin \omega t$. Deoarece transformarea de energie prin efect Joule nu depinde de sensul curentului, *rezistența activă se comportă în curentul alternativ la fel ca și în curentul continuu*. Se poate aplica legea lui Ohm $U = RI$, iar între tensiune și intensitate nu se produce nici o defazare.

La bornele rezistenței tensiunea și intensitatea sînt în fază (fig.5.8, *b*, *c*), adică u și i trec simultan prin valorile maxime sau cele nule. Puterea electrică ce caracterizează viteza de transformare a energiei electrice în altă formă de energie va fi

Scanned with OKEN Scanner

$P = UI$, iar energia consumată în timpul t va fi:

$$W = Pt = UIt.$$

5.7. **Bobină în curent alternativ.** Se consideră un circuit care conține o bobină cu inductanța L, având R și C neglijabile (fig. 5.9, *a*) iar la bornele lui se aplică o tensiune alternativă u. Prin bobină va circula un curent alternativ $i = I_m \sin \omega t$, care va produce un cîmp magnetic variabil. Ca urmare, în bobină se va autoinduce o tensiune $e_a = -L\frac{di}{dt} = -L\omega I_m \cos \omega t$. Ea va fi opusă tensiunii aplicate la borne u și va trebui să fie echilibrată de ea (fig. 5.9, *b*): $u = -e_a = L\omega I_m \cos \omega t$. Expresia $L\omega I_m = U_m$ reprezintă valoarea maximă a tensiunii, deci:

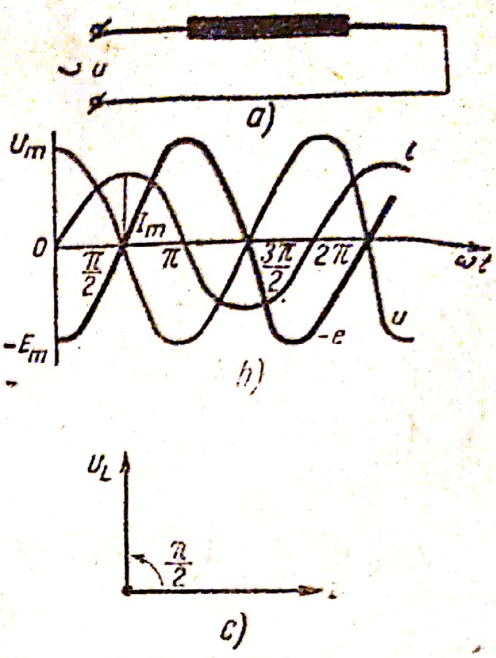


Fig. 5.9

$$U = U_m \cos \omega t = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Comparînd cu expresia lui i se constată că: *la bornele unei bobine în curent alternativ tensiunea este în avans de fază cu* $\frac{\pi}{2}$ *față de intensitate* (fig. 5.9, *c*). Prin comparație cu legea lui Ohm se observă că în expresia $U_m = L\omega I_m$ produsul $L\omega = X_L$ joacă rolul unei rezistențe. Se numește *reactanță inductivă* X_L:

$$\boxed{X_L = \omega L.} \qquad (1)$$

Reactanța inductivă este o rezistență aparentă, care depinde numai de inductanța bobinei și de frecvența curentului alternativ. Reactanța inductivă se măsoară în ohmi. În bobină nu se transformă energia electrică în energie internă, deci nu se produc pierderi în circuit. În concluzie: *o bobină produce în curent alternativ defazarea tensiunii înaintea intensității și introduce o rezistență aparentă, numită reactanță inductivă.*

Observație. Din (1) se observă că o bobină cu o inductanță mare, conectată la o tensiune alternativă de înaltă frecvență, introduce o reactanță inductivă atît de mare încît curentul nu mai trece. Se numește *bobină de șoc.*

Experiențele care urmează demonstrează aceste concluzii. Cu ajutorul unei instalații potențiometrice R, alimentată de o sursă continuă G_1 de cîțiva volți, se face montajul din figura 5.10, în care BDC este un fir foarte subțire din cupru, izolat și lung de 10...15 m, fără înfășurări și fixat într-un cui D. Voltmetrul V și ampermetrul A indică tensiunea la bornele firului și curentul din el. Menținînd același montaj, se înlocuiește sursa de tensiune continuă G_1 prin alta de tensiune alternativă G_2, de aceeași valoare. Ampermetrul indică aceeași intensitate ca în curentul continuu. Se repetă cele două experiențe la fel, firul fiind înfășurat pe un miez din fier divizat (fig. 5.11).

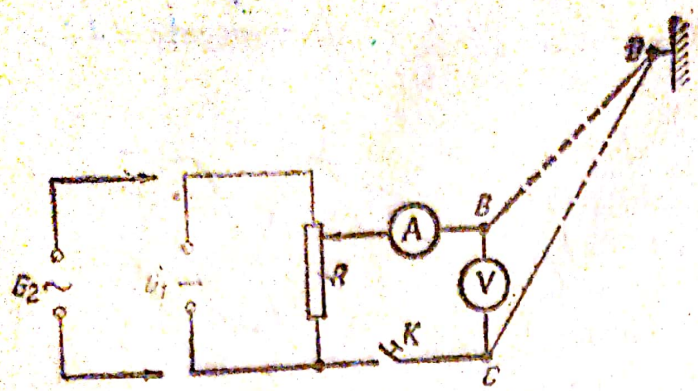


Fig. 5.10

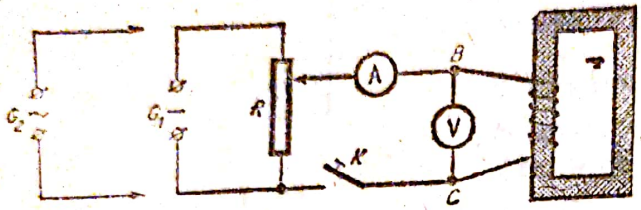


Fig. 5.11

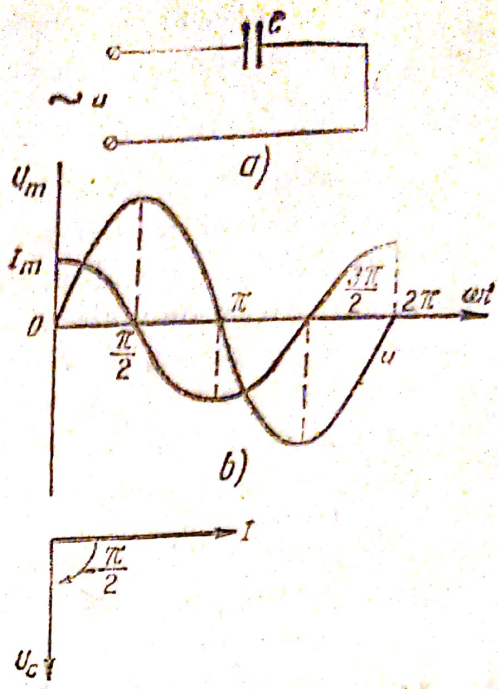


Fig. 5.12

De data aceasta, intensitatea în cazul curentului alternativ devine de mai multe ori mai mică, deci reactanța firului înfășurat este mai mare în cazul curentului alternativ decît rezistența în cazul curentului continuu.

5.8. **Condensator în curent alternativ.** Se consideră un circuit care conține un condensator cu capacitatea C, avînd R și L neglijabile (fig. 5.12). Dacă la bornele lui se aplică o tensiune continuă, curentul nu circulă, deoarece condensatorul întrerupe circuitul de curent continuu, prin dielectricul dintre armăturile lui. Dacă se aplică la borne o tensiune alternativă, curentul circulă. *Condensatorul închide circuitul de curent alternativ.* Fenomenul se explică astfel. La bornele condensatorului tensiunea variază necontenit. Le creșterea tensiunii condensatorul se încarcă, primind sarcini electrice Q, iar la scăderea tensiunii se descarcă cedînd sarcini electrice Q; apoi tensiunea crește în sens opus etc. Ca urmare tensiunea aplicată la borne $u = U_m \sin \omega t$ face să apară un curent $i = \frac{dQ}{dt}$. Însă $dQ = C \cdot du$, deci:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \cdot u'(t) = C\, \omega\, U_m \cos \omega t.$$

Expresia $C\, \omega\, U_m$ reprezintă valoarea maximă a curentului adică $I_m = C\, \omega\, U_m$, încît curentul într-un circuit cu condensator va fi:

$$i = I_m \cos \omega t = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Comparînd cu expresia lui u se constată că: *la bornele unui condensator în curent alternativ intensitatea este în avans de fază cu* $\frac{\pi}{2}$ *față de tensiune* (fig. 5.12, *b*, *c*). Prin analogie cu legea lui Ohm se observă că în expresia $I_m = C\, \omega\, U_m$, produsul $C\, \omega$ joacă

rolul unei conductanțe. Cu alte cuvinte în curentul alternativ produsul $C\omega$ joacă rolul unei rezistențe aparente numită *reactanță capacitivă* X_C:

$$X_C = \frac{1}{C\omega}. \qquad (2)$$

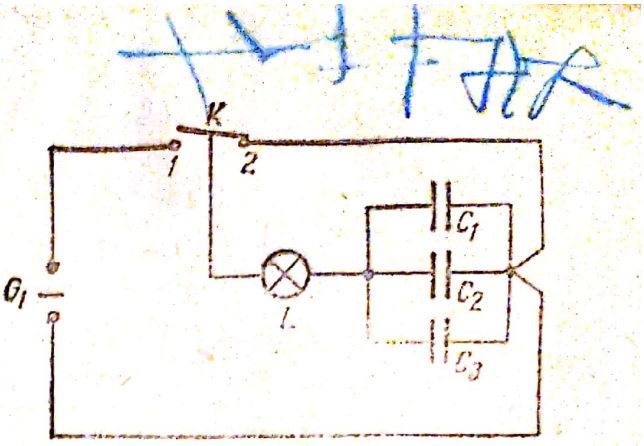


Fig. 5.13

Se constată că *reactanța capacitivă depinde numai de capacitatea condensatorului și de frecvența curentului alternativ*. Ea se măsoară în ohmi.

În condensator nu se transformă energie electrică în energie internă, deci nu se produc pierderi de putere în circuit. Așadar, reactanțele X_L și X_C nu dezvoltă căldură; numai rezistența activă R dezvoltă căldură; spunem că rezistența este singurul element disipativ de energie.

Este de subliniat un fapt. *Între armăturile condensatorului conectat la tensiune alternativă se generează un cîmp electric variabil în timp, care se comportă ca un curent alternativ. El închide circuitul de curent alternativ. Se numește curent de deplasare.*

În concluzie: *un condensator în curent alternativ are următoarele efecte: închide circuitul, defazează intensitatea înaintea tensiunii și introduce o reactanță capacitivă.*

Următoarele experiențe verifică aceste concluzii. Montajul din figura 5.13 este alimentat de o tensiune continuă de 10...15 V. Dacă se închide comutatorul K pe borna 1, beculețul L luminează un moment, indicînd curentul de încărcare, apoi se stinge, curentul se întrerupe. Aducînd comutatorul K pe borna 2, condensatorul se descarcă și beculețul luminează iar un moment. Se înlocuiește apoi sursa continuă G_1 cu alta alternativă de 4 V și se repetă experiența: beculețul L luminează tot timpul cît comutatorul stă pe borna 1.

5.9. **Circuit cu rezistor, bobină și condensator.** *a) Circuit serie.* Un circuit conține un rezistor de rezistență activă R, o bobină de inductanță L și un condensator de capacitate C, legate în serie și este alimentat de un generator cu o tensiune alternativă U (fig. 5.14, *a*). În el se stabilește un curent alternativ I. La bornele rezistorului se stabilește o cădere de tensiune U_R:

$$U_R = IR \text{ în fază cu } I;$$

la bornele bobinei se stabilește o cădere de tensiune U_L:

$U_L = I \cdot X_L$ în avans cu $\frac{\pi}{2}$ față de I; la bornele condensatorului se stabilește o cădere de tensiune U_C:

$$U_C = I \cdot X_C$$

în urma lui I cu $\frac{\pi}{2}$.

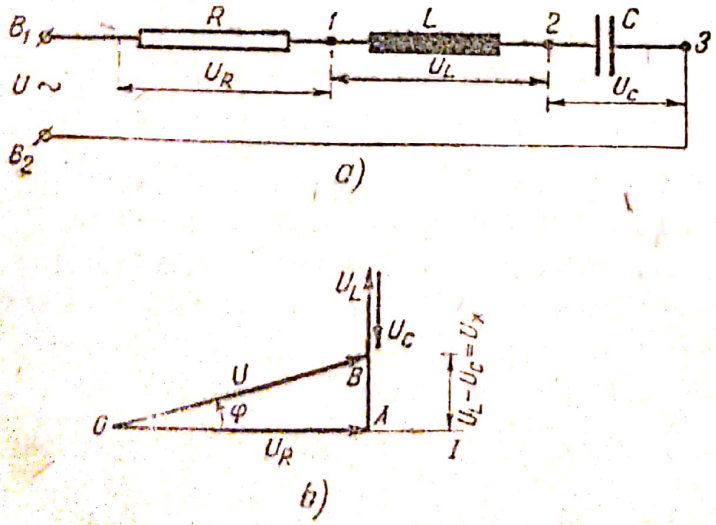


Fig. 5.14

Tensiunea la bornele circuitului U va fi suma vectorială a acestor căderi de tensiune, reprezentată pe diagrama fazorială (fig. 5.14, *b*). În triunghiul dreptunghic OBA, numit și triunghiul tensiunilor, se poate scrie:

$$U^2 = U_R^2 + U_X^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = I^2R^2 + I^2(X_L - X_C)^2$$

sau

$$\boxed{U = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \qquad (3)$$

Factorul care înmulțește pe I în expresia 3 joacă rol de rezistență și reprezintă rezistența echivalentă a întregului circuit serie pentru curentul alternativ. Se numește *impedanță* Z și se măsoară în ohmi:

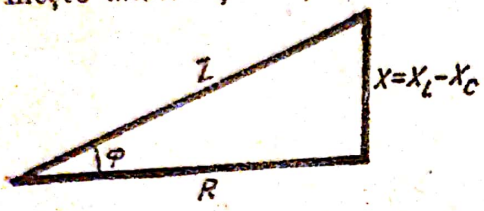


Fig. 5.15

$$\boxed{Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \qquad (4)$$

Expresia (3) devine:

$$\boxed{U = IZ} \qquad (3')$$

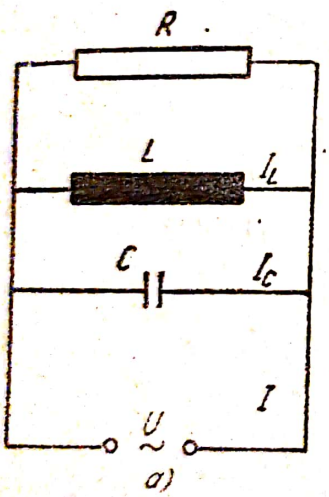
și reprezintă *legea lui Ohm în curentul alternativ*.

Împărțind laturile triunghiului tensiunilor prin valoarea constantă I a intensității efective se obține un triunghi asemenea cu primul, având ca laturi rezistențele activă și reactivă: se numește triunghiul impedanței (fig. 5.15). Unghiul de defazaj φ se poate scrie:

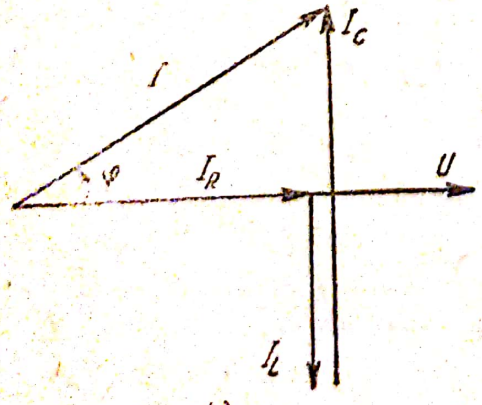
$$\boxed{\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R},} \qquad (5)$$

din care se poate calcula defazajul φ dintre I și U la bornele circuitului. Tensiunea la bornele circuitului fiind dată de ecuația $u = U_m \sin \omega t$, formula intensității din circuit va fi:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$



a)



b)

Fig. 5.16

b) *Circuit paralel.* Circuitul conține un rezistor cu rezistența R, o bobină cu inductanța L și un condensator cu capacitatea C, toate legate în paralel (fig. 5.16, *a*) la o tensiune alternativă U. Cele trei elemente din circuit R, L, C au aceeași tensiune U la bornele lor. În rezistor se stabilește un curent $I_R = \frac{U}{R}$ în fază cu tensiunea U, în bobină se stabilește curentul $I_L = \frac{U}{X_L}$ în ur-

ma tensiunii cu $\frac{\pi}{2}$, iar în condensator un curent $I_C = \frac{U}{X_C}$ avans cu $\frac{\pi}{2}$ față de U. Considerînd tensiunea U ca direcție de referință, diagrama fazorială a curenților va fi ca în figura 5.16, *b*. Pentru curenți de frecvență joasă ($\nu = 50$ Hz) teorema întîi a lui Kirchhoff rămîne valabilă. Deci intensitatea totală se calculează din triunghiul intensităților (fig. 5.16, *b*) în modul următor:

$$I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$$

sau

$$I^2 = \frac{U^2}{R^2} + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L}\right)^2 = \frac{U^2}{R^2} + U^2\left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2$$

sau

$$I = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2};$$

cum $I = \frac{U}{Z}$ înseamnă că radicalul corespunde lui $\frac{1}{Z}$, adică inversului impedanței. Unghiul de defazaj între I și U la bornele circuitului va fi

$$\operatorname{tg}\varphi = R\left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right).$$

Rezonanța intensităților. În circuitul paralel din figura 5.17, *a* să considerăm că s-a realizat condiția $X_L = X_C$ în care caz $C\omega - \frac{1}{L\omega} = 0$, deci $I = U\left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right) = 0$, iar impedanța circuitului $Z = \frac{1}{C\omega - \frac{1}{L\omega}} \to \infty$ (în practică foarte mare) pentru curenții care au frecvența ν_r corespunzătoare condiției $LC\omega^2 = 1$, de unde:

$$\nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ca și în cazul rezonanței serie. Deoarece $X_L = X_C$, urmează că și $I_L = I_C$, încît diagrama fazorială a curenților va fi cea din figura 5.17, *b*. Curentul de alimentare a circuitului va fi deci $I = I_L - I_C = 0$ (în practică $I \approx 0$, deoarece I_L nu este exact opus lui I_C, bobina avînd și rezistență activă). Se spune că s-a produs *fenomenul de rezonanță paralel* sau *rezonanța intensităților*. Fenomenul se demonstrează experimental prin montajul din

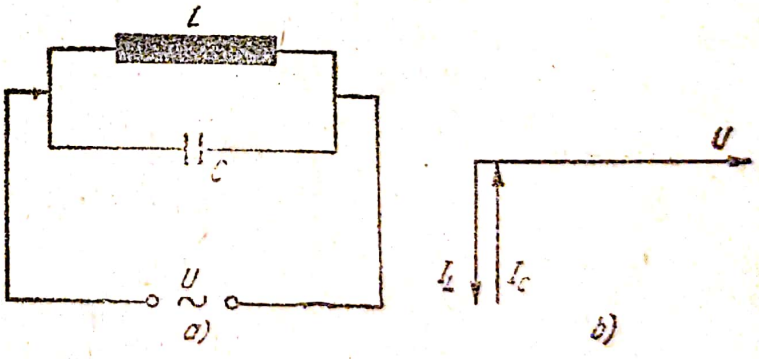


Fig. 5.17

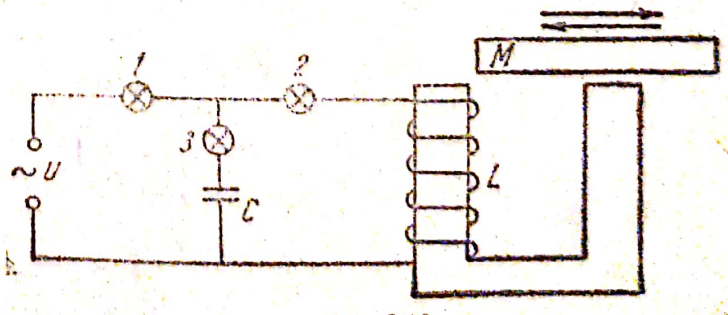


Fig. 5.18

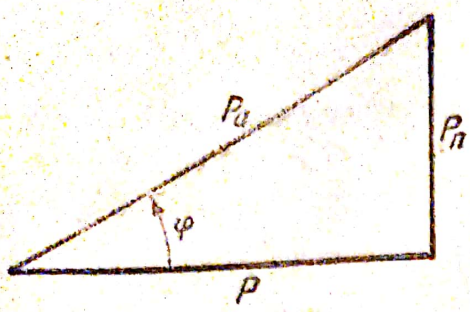


Fig. 5.19

figura 5.18. Prin deplasarea lentă orizontală, într-un sens ori în cel opus, a miezului M se găsește poziția pentru care becul 1 se stinge (ori luminează minim). Deplasarea miezului M într-o parte sau alta a acestei poziții face să scadă lumina becului 2 ori 3 și să crească lumina becului 1, indicînd astfel curentul de alimentare minim (becul 1) pentru cazul rezonanței.

5.10. **Puterea în curent alternativ monofazat.** Înmulțind cu I laturile triunghiului tensiunilor (fig. 5.14, *b*) apare un triunghi asemenea cu primul, avînd ca laturi valorile puterilor (fig. 5.19). Se numește triunghiul puterilor. Cateta orizontală $P = U_R \cdot I$ reprezintă puterea activă, adică puterea disipată, sub formă de energie internă, în rezistența activă R. Se observă pe figura 5.14, *b* că $U_R = U \cdot \cos\varphi$, deci:

$$\boxed{P = UI\cos\varphi.} \tag{6}$$

Factorul $\cos\varphi$ se numește *factor de putere* și reprezintă cosinusul unghiului de defazaj dintre tensiune și intensitate. Cu cît are valoarea mai mare — defazaj mai mic — cu atît puterea activă se apropie mai mult de valoarea maximă UI. Puterea activă se măsoară în wați. Cateta verticală $P_n = U_X \cdot I$ reprezintă *puterea reactivă*, adică puterea concentrată în cîmpurile magnetic și electric, ale bobinelor și condensatoarelor din circuit. Deoarece $U_X = U \cdot \sin\varphi$, urmează că:

$$\boxed{P_n = U \cdot I \cdot \sin\varphi.} \tag{7}$$

Puterea reactivă nu se consumă, ci reprezintă viteza cu care generatorul schimbă energie cu circuitul. Ea se măsoară cu o unitate numită *var** (inițialele cuvintelor volt-amper-reactiv). În triunghiul puterilor ipotenuza reprezintă *puterea aparentă:*

$$\boxed{P_a = U \cdot I.} \tag{8}$$

Se numește aparentă deoarece este puterea care se obține prin produsul dintre valorile lui U, care apare la citirea voltmetrului de la bornele circuitului (fig. 5.14, *a*) și ale lui I, care apare la citirea ampermetrului din circuit. Se măsoară într-o unitate numită VA (voltamper). Ea reprezintă energia furnizată în fiecare secundă circuitului de către generator. O parte din ea, puterea activă, este puterea pe care o poate utiliza consumatorul, iar cealaltă parte, puterea reactivă, este necesară pentru producerea cîmpului magnetic și a celui electric. Între aceste puteri există relația:

$$P_a^2 = P^2 + P_n^2.$$

* Introdusă la propunerea inginerului român C. Budeanu.

Constantin Budeanu (1886—1959). Inginer român. A făcut lucrări importante în domeniul raționalizării sistemelor de unități în electricitate.

Scanned with OKEN Scanner

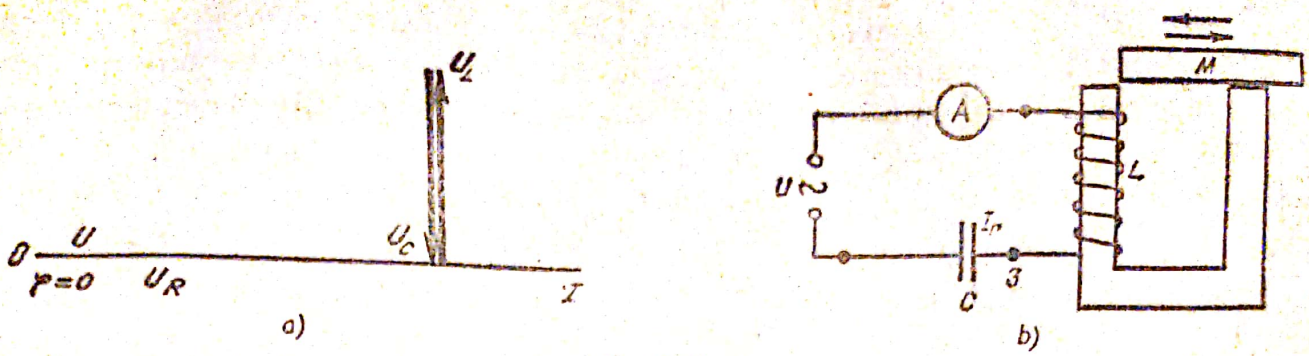


Fig. 5.20

5.11. **Rezonanța tensiunilor.** În circuitul serie din figura 5.14, *a* să considerăm că valorile inductanței L și ale capacității C sînt astfel alese încît *reactanța inductivă* X_L și *reactanța capacitivă* X_C *sînt egale*:

$$X_L = X_C.$$

În aceste condiții, tensiunile la bornele bobinei U_L și ale condensatorului U_C sînt egale și opuse (defazate cu π una față de alta):

$$U_L = -U_C,$$

încît diagrama fazorială devine aceea din figura 5.20, *a*. Se observă că în acest caz reactanțele se compensează, iar impedanța Z se reduce la valoarea rezistenței active R, adică $Z = R$. De asemenea, defazajul dintre U și I la bornele circuitului se reduce la zero, ceea ce are ca urmare faptul că prin circuit curentul I_r are valoarea maximă $I_r = \frac{U}{R}$. Spunem că *s-a produs fenomenul de rezonanță serie sau rezonanța tensiunilor*. La bornele bobinei apare o tensiune $U_L > U$, iar la bornele condensatorului una egală cu U_L; aceste tensiuni încarcă bobina, respectiv condensatorul, considerate separat — dacă sînt prea mari pot străpunge dielectricul condensatorului sau izolația bobinei — dar efectul lor global este nul. La rezonanță, bobina și condensatorul schimbă energia între ele în mod periodic, iar generatorul acoperă doar pierderile din circuit prin efect Joule. Pentru valorile lui L și C date, rezonanța se realizează pentru o anumită valoare a frecvenței ν_r:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow 4\pi^2 \cdot \nu_r^2 = \frac{1}{CL}, \text{ de unde:}$$

$$\boxed{\nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.} \qquad (9)$$

Fenomenul de rezonanță electrică are importante aplicații utile în radiotehnică. Poate avea însă consecințe dăunătoare pentru cabluri și mașini, dacă se realizează întîmplător în rețelele electrice industriale. Următoarea experiență demonstrează rezultatele arătate mai înainte. Pe o ramură a miezului de fier în U se introduce o bobină de inductanță L de 600... 1 200 spire, legată în serie cu un condensator de capacitate $C = 16\mu F$ și un ampermetru A (fig. 5.20, *b*). Se închide circuitul magnetic

cu miezul M, apoi se conectează tensiunea alternativă U de la rețea. Prin deplasarea lentă orizontală, într-un sens ori altul, a miezului M se găsește poziția pentru care ampermetrul A — ori un bec în locul lui — indică trecerea curentului de rezonanță I_r maxim.

Probleme rezolvate

1. Un curent alternativ cu pulsația 314 s^{-1} și faza inițială de $\frac{\pi}{6}$ radiani are valoarea maximă de 10 A. Se cer:

a. Reprezentarea analitică a intensității.

b. Reprezentarea grafică a intensității în funcție de ω.

c. Valoarea perioadei și a frecvenței.

d. Valorile instantanee ale intensității pentru t egal respectiv cu $0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}$.

Rezolvare: *a)* Prin analogie cu $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ se poate scrie:

$$i = 10 \sin\left(314\, t + \frac{\pi}{6}\right)$$

care este reprezentarea analitică a intensității (ecuația intensității).

b) Pentru reprezentarea grafică se face mai întîi tabelul de variație:

ωt	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	π	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{11\pi}{6}$	2π
α	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	π	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{11\pi}{6}$	2π	$\frac{13\pi}{6}$
i	5	$5\sqrt{3}$	10	$5\sqrt{3}$	5	0	−5	$-5\sqrt{3}$	−10	$-5\sqrt{3}$	−5	0	5

Deci reprezentarea grafică va fi sinusoida din figura 5.21 .

c) Din $\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{100\pi} = 0{,}02$ s.

$$\omega = 2\pi\nu \Rightarrow \nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50 \text{ Hz}.$$

d) $i_0 = 10 \sin\left(100\pi \cdot 0 + \frac{\pi}{6}\right) = 10 \sin\frac{\pi}{6} = 5\text{A}.$

$$i_1 = 10 \sin\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}\right) = 10 \sin\frac{\pi}{3} = 5\sqrt{3}\,A.$$

$$i_2 = 10 \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) = 10 \sin\frac{3\pi}{6} = 10\,A.$$

$$i_3 = 10 \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) = 10 \sin\frac{9\pi}{6} = -10\,A.$$

Scanned with OKEN Scanner

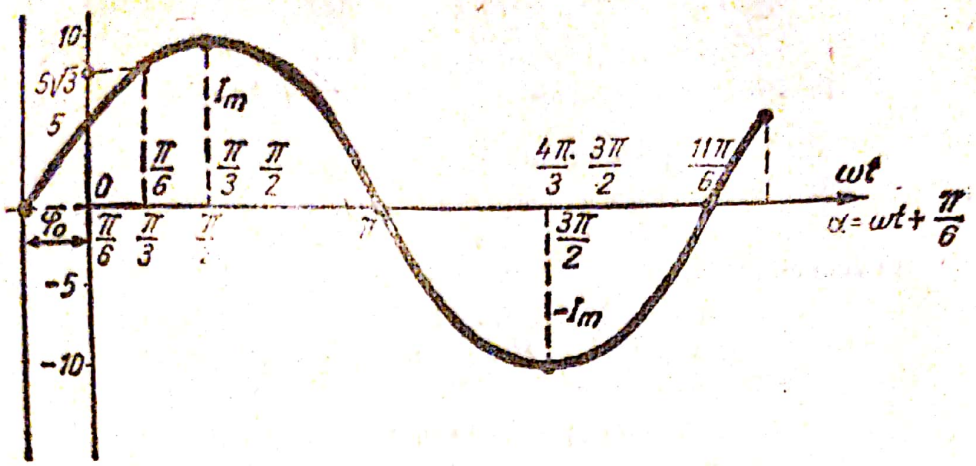


Fig. 5.21

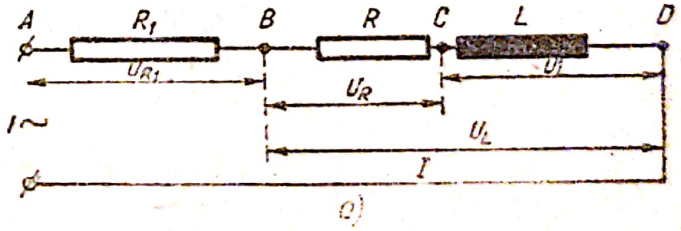
2. La bornele unui alternator care furnizează o tensiune efectivă de 100 V cu frecvenţa de 50 Hz, se conectează în serie un bec cu rezistenţa de 20 Ω şi o bobină, avînd rezistenţa activă R şi inductanţa L, necunoscute. La bornele becului se stabileşte o tensiune de 50 V, iar la bornele bobinei una de 70 V. Se cer:
   a. Intensitatea curentului în circuit.
   b. Rezistenţa activă a bobinei.
   c. Inductanţa bobinei.
   d. Puterile din bec şi bobină.
   e. Factorul de putere al circuitului şi puterea furnizată de alternator.

(Examen de bacalaureat — Franţa 1959.)

Rezolvare. Pe schema circuitului (fig. 5.22, *a*) figurăm rezistenţa activă R a bobinei separat de inductanţa L şi în serie cu ea, deşi ele sînt inseparabile; bornele bobinei sînt BD, ale rezistenţei active R_1 sînt AB, iar ale circuitului, AD.

a) din $U_{R_1} = IR_1 \Rightarrow I = \frac{U_{R_1}}{R_1} = \frac{50}{20} = 2{,}5$ A.

b) Diagrama fazorială a tensiunilor din circuit este în figura 5.22, *b*, becul fiind numai o rezistenţă activă R_1. Impedanţa circuitului $Z = \frac{U}{I} = \frac{100}{2{,}5} = 40\,\Omega$ şi impedanţa bobinei $Z' = \frac{U_L}{I} = \frac{70}{2{,}5} = 28\ \Omega$.



În triunghiul ACD se poate scrie:

$$U^2 = (U_{R_1} + U_R)^2 + (U'_L)^2,$$

iar în triunghiul DCB:

$$U'^2_L = U^2_R + (U'_L)^2.$$

Eliminînd $(U'_L)^2$ între ultimele două relaţii, se obţine:

$$U_R = \frac{U^2 - U^2_{R_1} - U'^2_L}{2U_{R_1}}$$

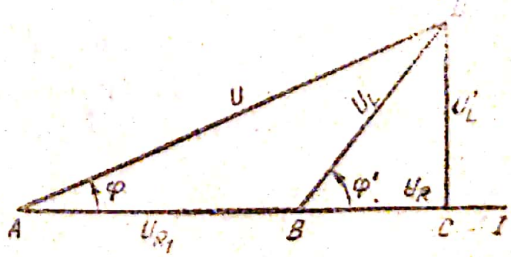


Fig. 5.22

și împărțind cu I^2, se obține rezistența activă a bobinei:

$$R = \frac{Z^2 - R_1^2 - (Z')^2}{2R_1} = \frac{40^2 - 20^2 - 28^2}{2 \cdot 20} = \frac{416}{40} = 10{,}4\ \Omega.$$

c) În triunghiul BCD scriem impedanța bobinei Z':

$$(Z')^2 = X_L^2 + R^2 \Rightarrow \omega^2 L^2 = (Z')^2 - R^2,$$

din care se deduce inductanța L:

$$L = \sqrt{\frac{(Z')^2 - R^2}{\omega^2}} = \frac{1}{2\pi\nu}\sqrt{28^2 - (10{,}4)^2};$$

$$L \approx 0{,}082\ \text{H} = 82\ \text{mH}.$$

d) Becul consumă puterea activă P_1

$$P_1 = R_1 I^2 = 20 \cdot 2{,}5^2 = 125\ \text{W}.$$

Puterea activă consumată în bobină $P' = U_R \cdot I = RI^2$:

$$P' = RI^2 = 10{,}4 \cdot 2{,}5^2 = 65\ \text{W}.$$

Puterea reactivă a bobinei $P_r = U_L \cdot I \sin \varphi'$.

Dar $\sin \varphi' = \frac{X_L}{Z'} = \frac{2\pi\nu L}{Z'} = \frac{100\pi \cdot 0{,}082}{28} = 0{,}92$,

deci:

$$P_r = 70 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}92 = 161\ \text{var}.$$

Puterea aparentă la bornele bobinei:

$$P_a = U_L \cdot I = 70 \cdot 2{,}5 = 175\ \text{voltamper}.$$

e) Factorul de putere va fi:

$$\cos \varphi = \frac{U_{R_1} + U_R}{U} = \frac{R_1 + R}{Z} = \frac{20 + 10{,}4}{40} = 0{,}751.$$

$P = UI \cdot \cos\varphi = 100 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}751 = 187{,}75$ watt.

$P_r = UI \cdot \sin \varphi = U_L I = U_L I \cdot \sin \varphi' = 161$ var.

$P_a = UI = 100 \cdot 2{,}5 = 250$ voltamper.

Întrebări, exerciții, probleme

1. Să se facă o comparație între repezentarea curentului alternativ prin fazori și cea prin sinusoide.
2. Să se arate prin reprezentare grafică deosebirea dintre curent continuu, curent alternativ sinusoidal și curent alternativ, în general.
3. În ce caz o bobină reală produce o defazare de 90° a tensiunii înaintea intensității curentului alternativ?
4. De ce valoarea medie a unei mărimi sinusoidale (i sau u) pe o perioadă este nulă?
5. De ce puterea activă este nulă în circuitul numai cu inductanță sau numai cu capacitate (ideale)?
6. Să se arate de ce condensatorul întrerupe circuitul de curent continuu și închide pe cel de curent alternativ. Să se explice electronic aceste procese.

Scanned with OKEN Scanner

7. Cum se reprezintă în scheme o bobină reală L care conține și rezistență activă? Prezintă un avantaj această reprezentare?

8. Intensitatea unui curent alternativ este reprezentată prin ecuația:

$$i = 100 \sin\left(200\pi t - \frac{\pi}{3}\right).$$

Se cer:
a) Perioada și frecvența curentului.
b) Valorile instantanee ale lui i pentru momentele 0 s, 0,152 s.
c) Reprezentarea grafică a lui i în funcție de ωt.

Răspuns: 10^{-2} s; 10^2 Hz; — 86,5 A; 20,8A

9. Într-o bobină cu inductanța de 500 mH este un curent alternativ de 0,5 A, cu frecvența de 50 Hz. Care este tensiunea la bornele bobinei?

Răspuns: 78,5 V.

10. O bobină cu miez de fier, conectată la o tensiune continuă de 6 V este parcursă de 7,5 A. Conectată la o tensiune alternativă de 105 V, cu pulsația de 100 π s^{-1}, este parcursă de 1,8 A.

Se cer:

a. Impedanța bobinei.
b. Inducțanța bobinei.
c. Defazajul dintre i și u la bornele ei.

Răspuns: 58,33 Ω; 185 mH; 89°12'.

11. Într-o locuință sînt montate două lămpi electrice de 150 W fiecare, trei lămpi de cîte 75 W, două lămpi de cîte 25 W și două plite electrice de cîte 600 W. Tensiunea rețelei este de 120 V. Pentru ce curent trebuie calculate siguranțele, dacă el trebuie să depășească cu 35% valoarea reală a curentului de consum, cînd funcționează simultan toate aceste aparate?

Răspuns: ≈ 20 A.

12. Un cadru cu 150 de spire și secțiunea de 200 cm^2 se rotește cu 3 600 rot/min, în jurul unui ax, perpendicular pe liniile unui cîmp de inducție de 0,8 tesla. Se cer:

a. t.e.m. efectivă indusă la bornele cadrului;
b. curentul în cadru, dacă circuitul său este închis printr-o rezistență de 100 Ω, cadrul avînd de asemenea 100 Ω.

Răspuns: 641,3 V; 3,2 A.

13. Într-un circuit de curent alternativ cu frecvența 50 Hz se află în serie un reostat și o bobină cu rezistența neglijabilă și inductanța de 100 mH. Se cer:

a. Rezistența reostatului, știind că bobina produce un defazaj de 30° la bornele circuitului, între I și U.

b. Capacitatea ce ar trebui conectată în circuit pentru a înlătura defazajul.

Răspuns: 54,4 Ω; 162μF.

14. Un circuit serie conectat la o tensiune alternativă de 10 V cu frecvența de 50 Hz este format dintr-o bobină, cu rezistența activă de 4 Ω și inductanța de $\frac{10}{\pi}$ mH, precum și o capacitate de $\frac{2{,}5 \cdot 10^3}{\pi}$ μF. Se cer:

a. Intensitatea curentului și diagrama fazorială a tensiunilor.

Scanned with OKEN Scanner

b. Defazajul la bornele circuitului și la bornele bobinei.
c. Tensiunea la bornele bobinei.
d. Puterile în circuit.

Răspuns: 2A; $-36°50'$; 14°; 8,24 V; 116 W; 12 var; 20 VA.

15. Un circuit format dintr-un condensator cu capacitatea de 100 μF legat în serie cu o bobină care are rezistența de 2 Ω și inductanța de 101,4 mH este alimentat la o tensiune de 110 V cu 50 Hz. Se cer:

a. Intensitatea în circuit.
b. Triunghiul tensiunilor și triunghiul rezistențelor.
c. Tensiunile de la bornele bobinei, respectiv condensatorului.
Ce se poate spune despre acest circuit?

Răspuns: 55 A; 1 751 V; 1 751 V.

16. Un circuit de curent alternativ este compus dintr-o bobină cu rezistența activă de 2 Ω și reactanța inductivă de 170 Ω, legată în serie cu un condensator, care are reactanța capacitivă de 105 Ω. Este alimentat la o tensiune de 110 V cu frecvența 50 Hz. Se cer:

a. Reactanța circuitului.
b. Intensitatea în circuit.
c. Inductanța bobinei și capacitatea condensatorului.

Răspuns: 65 Ω; 1,69 A; 0,54 H; 30,3 μF.

17. Un circuit este format dintr-un condensator de $\frac{2 \cdot 10^3}{\pi}$ μF, legat în serie cu o bobină, care are rezistența activă de 4 Ω și inductanța de $\frac{20}{\pi}$ mH. Circuitul este alimentat la o tensiune instantanee $U = 20\sqrt{2} \sin 100\pi t$ volți. Bobina are 200 de spire și servește ca primar unui transformator cu 25 de spire la secundar. Se cer:

a. Frecvența curentului de alimentare și perioada lui.
b. Triunghiul impedanței și intensitatea în circuit.
c. Tensiunea la bornele bobinei și cea la bornele condensatorului.
d. Defazajul dintre I și U la bornele bobinei și cea de la bornele circuitului.
e. Tensiunea la bornele secundarului transformatorului.

(Olimpiada de fizică, etapa republicană, 1965.)

Răspuns: 50 Hz; 0,02s; 4 A; $8\sqrt{5}$ V; 20 V; 26°40'; $-36°50'$; $\sqrt{5}$ V.

18. Alimentată la o tensiune continuă de 100 V, o bobină este parcursă de 2,5 A, iar la o tensiune alternativă de 100 V și frecvența 50 Hz intensitatea este de 2 A. În serie cu bobina se conectează un condensator de $\frac{500}{3\pi}$ μF, iar circuitul format se conectează tot la tensiunea alternativă de 100 V. Se cer:

a. Rezistența și inductanța bobinei.
b. Intensitatea prin circuitul cu condensator.
c. Tensiunea la bornele bobinei și diagrama fazorială a tensiunilor în cazul *b*.
d. Defazajul la bornele bobinei, apoi la bornele circuitului, semnificația fizică a rezultatului.
e. Valoarea capacității unui condensator, care ar produce rezonanța și valoarea curentului în acest caz.
f. Puterea activă și cea reactivă în cazul *b*.

(Olimpiada de fizică, etapa republicană, 1966.)

Răspuns: 40 Ω; $\frac{0,3}{\pi}$ H; 2A; 100 V; 100 V; 36°50'; $-36°50'$; $\frac{10^3}{3\pi}$ μF; 2,5A; 160 W; 120 var.

Scanned with OKEN Scanner

b. Defazajul la bornele circuitului și la bornele bobinei.
c. Tensiunea la bornele bobinei.
d. Puterile în circuit.

Răspuns: 2A; $-36°50'$; 14°; 8,24 V; 116 W; 12 var; 20 VA.

15. Un circuit format dintr-un condensator cu capacitatea de 100 μF legat în serie cu o bobină care are rezistența de 2 Ω și inductanța de 101,4 mH este alimentat la o tensiune de 110 V cu 50 Hz. Se cer:

a. Intensitatea în circuit.
b. Triunghiul tensiunilor și triunghiul rezistențelor.
c. Tensiunile de la bornele bobinei, respectiv condensatorului.

Ce se poate spune despre acest circuit?

Răspuns: 55 A; 1 751 V; 1 751 V.

16. Un circuit de curent alternativ este compus dintr-o bobină cu rezistența activă de 2 Ω și reactanța inductivă de 170 Ω, legată în serie cu un condensator, care are reactanța capacitivă de 105 Ω. Este alimentat la o tensiune de 110 V cu frecvența 50 Hz. Se cer:

a. Reactanța circuitului.
b. Intensitatea în circuit.
c. Inductanța bobinei și capacitatea condensatorului.

Răspuns: 65 Ω; 1,69 A; 0,54 H; 30,3 μF.

17. Un circuit este format dintr-un condensator de $\frac{2 \cdot 10^3}{\pi}$ μF, legat în serie cu o bobină, care are rezistența activă de 4 Ω și inductanța de $\frac{20}{\pi}$ mH. Circuitul este alimentat la o tensiune instantanee $U = 20\sqrt{2}$ sin $100\pi t$ volți. Bobina are 200 de spire și servește ca primar unui transformator cu 25 de spire la secundar. Se cer:

a. Frecvența curentului de alimentare și perioada lui.
b. Triunghiul impedanței și intensitatea în circuit.
c. Tensiunea la bornele bobinei și cea la bornele condensatorului.
d. Defazajul dintre I și U la bornele bobinei și cea de la bornele circuitului.
e. Tensiunea la bornele secundarului transformatorului.

(Olimpiada de fizică, etapa republicană, 1965.)

Răspuns: 50 Hz; 0,02s; 4 A; $8\sqrt{5}$ V; 20 V; 26°40'; $-36°50'$; $\sqrt{3}$ V.

18. Alimentată la o tensiune continuă de 100 V, o bobină este parcursă de 2,5 A, iar la o tensiune alternativă de 100 V și frecvența 50 Hz intensitatea este de 2 A. În serie cu bobina se conectează un condensator de $\frac{500}{3\pi}$ μF, iar circuitul format se conectează tot la tensiunea alternativă de 100 V. Se cer:

a. Rezistența și inductanța bobinei.
b. Intensitatea prin circuitul cu condensator.
c. Tensiunea la bornele bobinei și diagrama fazorială a tensiunilor în cazul *b*.
d. Defazajul la bornele bobinei, apoi la bornele circuitului, semnificația fizică a rezultatului.
e. Valoarea capacității unui condensator, care ar produce rezonanța și valoarea curentului în acest caz.
f. Puterea activă și cea reactivă în cazul *b*.

(Olimpiada de fizică, etapa republicană, 1966.)

Răspuns: 40 Ω; $\frac{0,3}{\pi}$ H; 2A; 100 V; 100 V; 36°50'; $-36°50'$; $\frac{10^3}{3\pi}$ μF; 2,5A; 160 W; 120 var.

Scanned with OKEN Scanner

19. O rezistență de 0,4 kΩ și o bobină cu $L = 20$ mH sînt conectate în paralel la tensiunea de 20 V, cu pulsația de $5 \cdot 10^3$ s^{-1}. Se cer:
a. curenții prin ramuri și curentul total;
b. unghiul de fază dintre I și U.

Răspuns: 50 mA; 0,2 A; 0,206 A; 78°.

20. O rezistență de 1 kΩ, o bobină de 0,2 mH și un condensator de 300 pF sînt conectate în paralel la o tensiune de 1 V cu frecvența de 250 kHz. Se cer:
a. curenții în ramuri și curentul total;
b. unghiul de fază dintre I și U.

Răspuns: 1 mA; 3,2 mA; 0,47 mA; 2,9 mA; 70°.

21. O bobină de 1 mH și rezistență neglijabilă este conectată în paralel cu un condensator de 40 μF, la o tensiune alternativă de 2 V. Se cer:
a. frecvența de rezonanță a curenților;
b. curenții din ramuri.

Răspuns: $5 \cdot 10^3$ Hz; 0,4 A; 0,4 A.

Scanned with OKEN Scanner

6. Mașini electrice rotative

A. Mașini de curent alternativ

6.1. **Clasificarea mașinilor electrice.** *Mașinile care transformă energia mecanică în energie electrică se numesc generatoare electrice.* Mașinile care fac transformarea inversă poartă numele de *motoare electrice* sau *electromotoare.* Generatoarele și electromotoarele sînt *mașini electrice rotative.*

După felul curentului electric produs ori utilizat pentru funcționare, mașinile electrice pot fi de două feluri: *de curent alternativ* și *de curent continuu.* Mașinile de curent alternativ pot să fie sincrone sau asincrone.

6.2. **Alcătuirea mașinilor electrice rotative.** *Generatoarele electrice funcționează pe baza fenomenului de inducție electromagnetică*, iar *electromotoarele pe baza forței electromagnetice*, produsă de un cîmp magnetic asupra unui conductor, prin care circulă curent electric. Orice mașină electrică rotativă va avea, deci, două părți principale: una din ele produce cîmpul magnetic inductor și se numește *inductor*, iar ce de-a doua se numește *indus*; acesta constă din bobine cu miez de fier, în care se induce tensiunea electromotoare. Una din aceste două părți este fixă și se numește *stator*, cealaltă este mobilă și se numește *rotor*. De aceea, asemenea mașini se numesc mașini electrice rotative. În cazul mașinilor de curent alternativ în general indusul este stator, iar inductorul este rotor. La cele de curent continuu, inductorul este stator, iar indusul este rotor. Mașinile electrice rotative sînt de aceea de două feluri: cu cîmp magnetic $\vec{B}$ învîrtitor și cu indus fix sau mobil (pentru curent alternativ) sau cu cîmp magnetic $\vec{B}$ fix și cu indus rotativ (pentru curent continuu).

Scanned with OKEN Scanner

6.3. **Principiul generatorului de curent alternativ monofazat** (alternator). *La capetele unei spire care se rotește într-un cîmp magnetic ia naștere o tensiune electromotoare alternativă*, cum s-a arătat la capitolul 5. Același fenomen se produce și în cazul cînd spira stă pe loc, iar cîmpul magnetic se rotește; acesta este cazul alternatorului. Principiul lui de funcționare se demonstrează prin următoarea experiență.

Experiență. În apropierea unei bobine cu miez de fier (fig. 5.3.) se rotește un magnet în formă de bară, în jurul unui ax orizontal. Instrumentul de măsurat indică existența în bobină a unui curent alternativ. Bobina limitează în fiecare moment un flux de inducție variabil, care induce în bobină o t.e.m. alternativă. În timp ce polul N al magnetului se apropie de bobină, curentul indus are, conform regulii lui Lenz, sensul indicat (fig. 5.3., *a*), ce crează un pol N la capătul dinspre magnet. Cînd polul N al magnetului se depărtează, sensul curentului se schimbă, inversîndu-se și polaritatea bobinei care se păstrează astfel și în intervalul de timp cît se apropie polul Sud al magnetului (fig. 5.3, *b*, *c*). La o rotație completă a magnetului, în spiră se produc două alternanțe, adică curentul produs efectuează o perioadă completă. Acul instrumentului oscilează, indicînd existența unui curent alternativ. Bobina reprezintă statorul-indus al generatorului, iar magnetul reprezintă rotorul-inductor al generatorului. Așadar, funcționarea alternatorului se bazează pe inducția electromagnetică produsă într-o bobină aflată într-un cîmp magnetic învîrtitor.

6.4. **Construcția și funcționarea alternatorului.** Partea mobilă — rotorul — este formată dintr-un număr de electromagneți, care alcătuiesc inductorul alternatorului. Inductorul generează fluxul magnetic necesar funcționării alternatorului. Polii electromagneților alternează ($N_1S_1N_2S_2$...) (fig. 6.1., *a*). Inductorul este alimentat cu curent continuu (curent de excitație) produs de un mic dinam G (excitatoare), montat chiar pe axul alternatorului. De la excitatoare curentul vine la două perii P_1 și P_2, care fac contact alunecător cu două inele de cupru I_1 și I_2, fixate pe axul rotorului, dar izolate de el și între ele. De inele sînt fixate capetele înfășurării electromagneților în R_1 și R_2. Inductorul este pus în rotație de către un motor, care poate fi o turbină cu aburi, o turbină hidraulică, un motor Diesel etc.

Generatorul acționat de o turbină cu aburi se numește turbogenerator. Generatorul acționat de o turbină hidraulică poartă denumirea de hidrogenerator.

Statorul — indusul — alternatorului este alcătuit dintr-o carcasă și un miez de oțel, în formă inelară, care poartă bobinajele, înfășurate ca în figura 6.1., *a*. Capetele bobinajelor sînt aduse la bornele B_1B_2, de unde se poate lua curentul alternativ produs de generator. Funcționarea generatorului se poate urmări pe figura 6.1. Prin rotirea inductorului liniile de cîmp magnetic produse de polii săi taie conductoarele bobinajului din stator, în care induc tensiuni electromotoare. În situația schițată pe figura 6.1, *a*, polul N_1 se apropie de bobina A, S_1 se apropie de B, N_2 se apropie de C, iar S_2 se apropie de D, făcînd să crească fluxul în aceste bobinaje. Săgețile indică sensul curentului indus, care face borna B_2 pozitivă, iar borna B_1 negativă. În momentul cînd polii inductorului ajung exact în fața bobinajelor statorului, fluxul de inducție în bobinele indusului este maxim, iar t.e.m. indusă este nulă. Polii inductorului depășesc această poziție și ajung în situația din figura 6.1, *b*, cînd induc

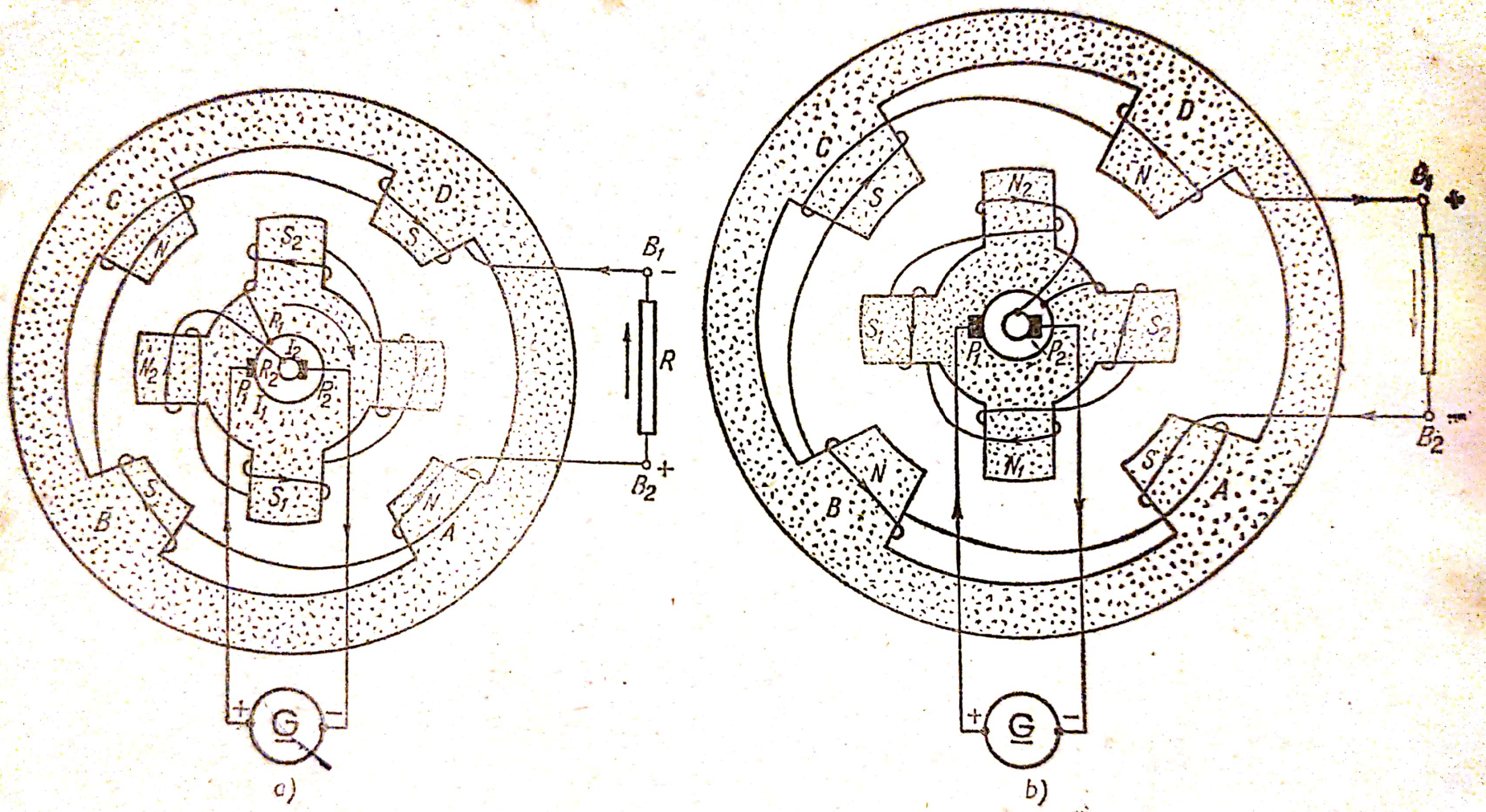


Fig. 6.1

curent de sens contrar, care face borna B_1 pozitivă și borna B_2 negativă etc. Prin urmare, în indusul alternatorului ia naștere o tensiune alternativă.

Notăm cu n turația rotorului în rot/min și cu p numărul perechilor de poli ai rotorului. Pentru fiecare pereche de poli ai rotorului care se apropie ori se depărtează, în una dintre bobine (deci concomitent și în celelalte) se desfășoară o perioadă completă. Cum în fiecare rotație prin dreptul bobinei trec p perechi de poli, iar într-o secundă $p\frac{n}{60}$ perechi de poli, urmează că în acest interval de timp se produc $p\frac{n}{60}$ perioade. Deci, $\nu = \frac{pn}{60}$ exprimată în Hz.

În țara noastră, ca și în toate țările europene, frecvența curentului alternativ industrial trebuie să fie de 50 Hz. Pentru un anumit număr de perechi de poli ai inductorului, acesta trebuie rotit cu o anumită viteză unghiulară, numită viteză de sincronism, ca să producă frecvența standard de 50 Hz. De exemplu, un rotor cu patru perechi de poli trebuie să facă 750 rotații pe minut.

Curentul alternativ indus în bobinele statorului produce un cîmp magnetic, care se învîrtește: este un cîmp magnetic învîrtitor. El se rotește cu aceeași viteză cu care se rotește rotorul, deci cu aceeași viteză cu care se rotește cîmpul magnetic al rotorului. Cele două cîmpuri magnetice sînt în sincronism. Alternatorul este un generator sincron.

6.5. **Reversibilitatea mașinilor electrice rotative; motor sincron.** Să analizăm mai amănunțit funcționarea unei mașini electrice rotative. Se prezintă două situații: 1) Cîmpul magnetic constant $\vec{B}$ al inductorului se învîrtește și intersectează succesiv conductoarele indusului; 2) Cîmpul magnetic constant $\vec{B}$ al inductorului poate fi fix, iar conductoarele indusului să se învîrtească și să intersecteze liniile acestui cîmp. Ambele fenomene sînt echivalente. Fie conductorul MN (fig. 6.2, *a*) care taie cîmpul $\vec{B}$ cu viteza $\vec{v}$. Electronii liberi din conductor sînt supuși unei forțe Lorentz, care-i deplasează spre capătul M, între capetele MN luînd astfel naștere o tensiune electromotoare e. Mașina funcționează ca generator și furnizează energie electrică. Pentru aceasta ea trebuie să absoarbă din exterior energie mecanică, adică rotorul să fie acționat de către un motor exterior.

Să deconectăm motorul care acționează rotorul și să introducem în conductoarele indusului de la o sursă exterioară (fig. 6.2. *b*) curent electric. Considerăm la un moment dat polaritatea din figură. Fiecare electron care se mișcă formînd curentul din conductor este supus unei forțe Lorentz ceea ce face ca acest conductor să fie acționat de o forță electromagnetică $\vec{F}$, care pune conductorul, deci rotorul, în mișcare. Mașina funcționează ca motor și furnizează energie mecanică. Pentru aceasta ea trebuie să absoarbă din exterior energie electrică, adică spirele indusului să fie alimentate de un generator electric exterior. Prin urmre, mașinile electrice rotative sînt reversibile; ele pot funcționa ca generator sau ca electromotor. Pentru ca alternatorul să

Scanned with OKEN Scanner

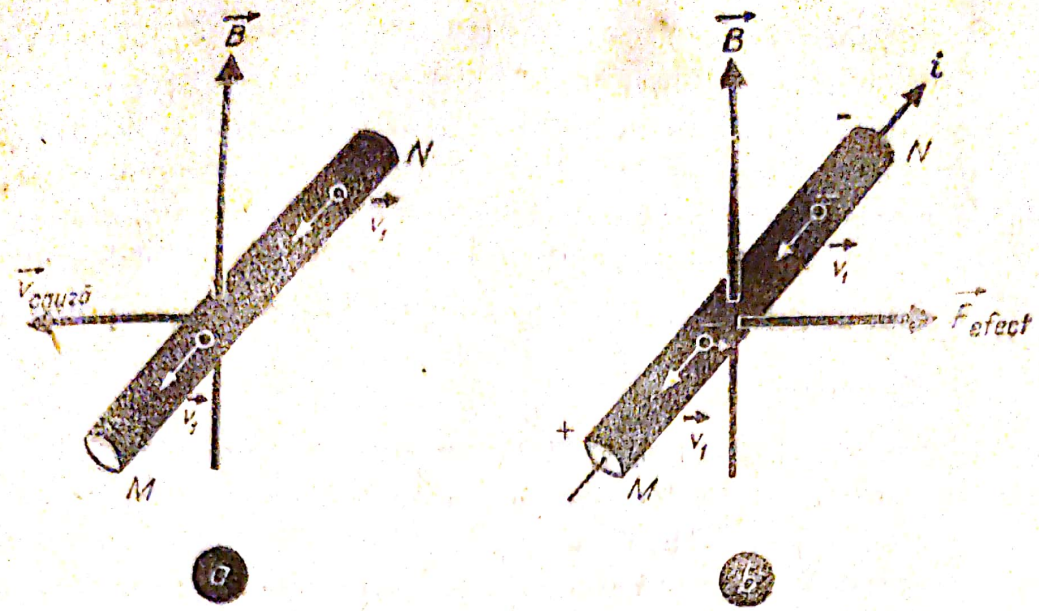


Fig. 6.2

funcționeze ca electromotor, se scoate rezistența de sarcină dintre bornele B_1B_2 (fig. 6.1.) și se îndepărtează motorul care acționa rotorul. La bornele B_1B_2 se conectează o tensiune alternativă în opoziție cu cea produsă de alternator. Bobina A va respinge polul N_1 și va atrage polul S_1, bobina B va respinge polul S_1 și va atrage polul N_2 etc., ceea ce va avea ca urmare rotirea rotorului în sens antiorar. Cînd polii rotorului ajung exact în fața bobinelor statorului se schimbă sensul tensiunii din stator, ceea ce are ca urmare continuarea mișcării rotorului. Este necesar strictul sincronism cu turația rotorului, deci frecvența de rotație a rotorului și frecvența curentului din stator să fie egale. Dacă această condiție de sincronism nu-i îndeplinită, electromotorul nu funcționează. De aceea se numește motor sincron. Motorul sincron nu pornește din repaus; trebuie mai întîi adus rotorul la viteza de sincronism printr-un mijloc oarecare, apoi el își continuă mișcarea. Acesta este cel mai important neajuns al motorului sincron. De aceea, mașinile electrice sincrone sînt folosite mai ales ca generatoare. Ca motoare se folosesc mașinile asincrone, de curent trifazat.

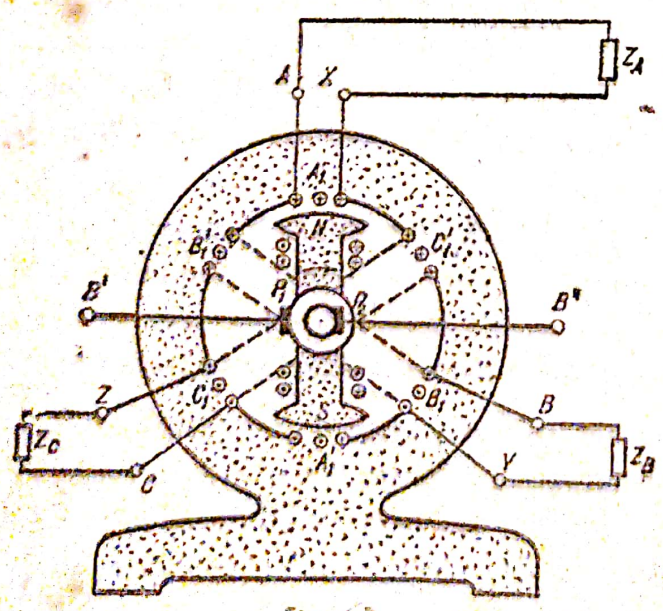


Fig. 6.3

6.6. **Generator trifazat.** Pe statorul inelar se fixează trei înfășurări identice A_1A_1', B_1B_1', C_1C_1' (fig. 6.3), independente și montate la 120° una față de alta. Rotorul inductor NS este alimentat cu curent continuu la bornele B' și B''. Înfășurările sînt reprezentate perpendicular pe planul figurii. Bornele lor A, B, C se

numesc începutul fazelor, iar bornele X, Y, Z se numesc sfîrșitul fazelor. Prin fază, în acest caz, se înțelege unul din circuite. Rotorul este acționat de un motor exterior. Bobinele rotorului sînt excitate de un curent continuu prin periile P_1 și P_2. Rotorul trece succesiv prin fața înfășurărilor în care induce t.e.m. alternative, de aceeași valoare maximă E_m. Aceste t.e.m. nu trec simultan prin valoarea maximă, deci nu sînt în aceeași fază una față de alta. T.e.m. indusă ajunge la valoarea maximă mai întîi în bobina A_1A_1' (fig. 6.3), apoi în bobina B_1B_1' după ce rotorul descrie un unghi de 120°, adică, în această bobină, t.e.m. este defazată cu $\frac{2\pi}{3}$ în urma celei din bobina A_1A_1'. T.e.m. indusă în bobina C_1C_1' va fi defazată cu $\frac{2\pi}{3}$ față de cea din B_1B_1' și cu $\frac{4\pi}{3}$ față de t.e.m. din bobina A_1A_1'. Fiecare din ele, considerată separat, constituie o tensiune alternativă monofazată. Toate trei împreună constituie un sistem trifazat. Așadar:

Sistemul format din trei circuite electrice de curent alternativ cu aceeași frecvență, ale cărui t.e.m. sînt defazate între ele cu 1/3 de perioadă $\left(2\frac{\pi}{3}\ \text{radiani}\right)$, *se numește sistem trifazat.*

Dacă cele trei t.e.m. au valorile maxime egale, sistemul trifazat se numește *simetric*.

T.e.m. ale celor trei faze se pot exprima analitic prin expresiile:

$$e_A = E_m \sin\ \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Ca origine a timpului se consideră momentul cînd t.e.m. din înfășurarea primei faze AX trece prin valoarea zero.

Reprezentarea grafică a acestor 3 t.e.m. va fi un ansamblu de trei sinusoide, defazate cu $2\pi/3$ una față de alta (fig. 6.4.).

Cele trei t.e.m. se pot reprezenta mult mai simplu prin fazori (fig. 6.5.) Fazorul E_A reprezintă modulul tensiunii maxime din înfășurarea AX, avînd unghiul ce reprezintă faza inițială nul.

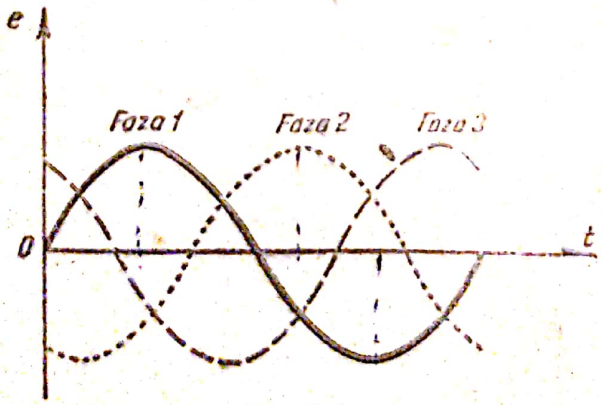


Fig. 6.4

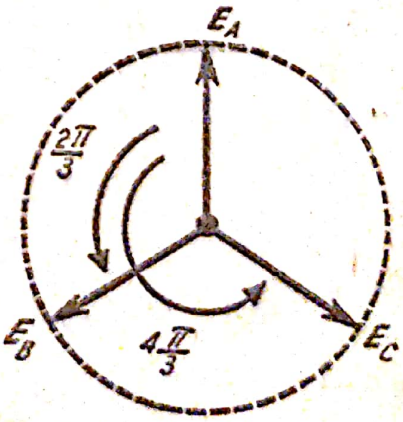


Fig. 6.5

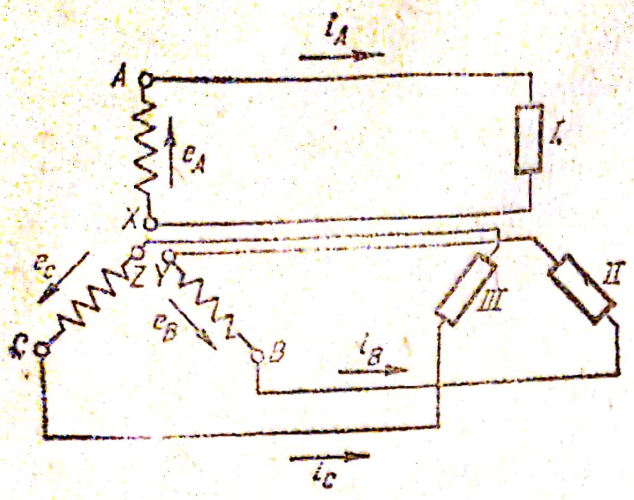


Fig. 6.6

Fazorul E_B reprezintă modulul tensiunii maxime din înfășurarea BY, defazată în urmă cu unghiul $\frac{2\pi}{3}$; analog fazorul E_C este defazat în urmă cu unghiul $\frac{4\pi}{3}$ față de E_A.

Fiecare înfășurare a generatorului trifazat poate fi considerată o sursă electrică separată și poate alimenta un consumator, I, II sau III. În acest caz sînt necesare șase conductoare pentru a conduce curentul de la înfășurările generatorului (fig. 6.6) la consumatoare. Un asemenea montaj se numește sistem trifazat cu faze independente. Nefiind economic, acest montaj nu-i folosit în practică.

6.7. Montaj în stea. În acest montaj, sfîrșitul fazelor X, Y, Z se unesc într-un punct numit punct neutru sau nul. Punctul neutru al generatorului se unește cu punctul neutru al consumatoarelor, legate ca în figura 6.7, printr-un conductor numit *fir neutru*. Începutul fazelor A, B, C se leagă cu consumatoarele A', B', C' prin conductoare numite *conductoare de linie*. Dacă cele trei consumatoare sînt identice, sistemul trifazat este *echilibrat*. În acest caz, valorile maxime ale celor trei curenți sînt egale $I_A = I_B = I_C$, iar suma fazorilor lor este nulă în fiecare moment $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$.

Acest lucru se poate demonstra cu ajutorul reprezentării prin fazori (fig. 6.8). I_A, I_B, I_C reprezintă intensitățile la un moment dat. $I_B + I_C$ se adună vectorial și dau rezultanta $I_1 = -I_A$. Această rezultantă adunată cu I_A va da suma nulă, cum s-a spus mai înainte. Din această cauză curentul din firul neutru este nul, iar acest fir poate lipsi. Punctul neutru al generatorului O (fig. 6.7) și O' al consumatoarelor se pun la pămînt. Se transmite astfel energia electrică de la generatorul trifazat la

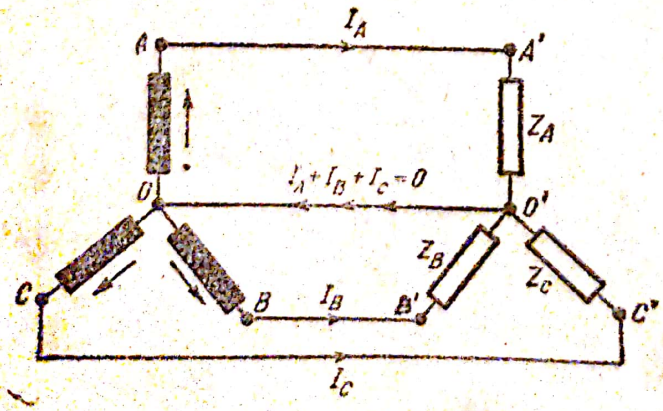


Fig. 6.7

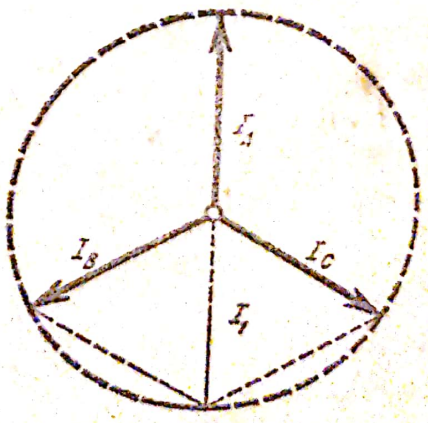


Fig. 6.8

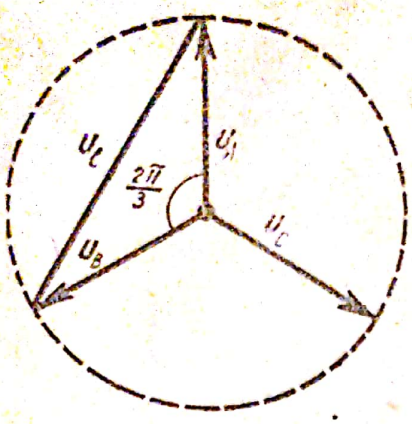


Fig. 6.9

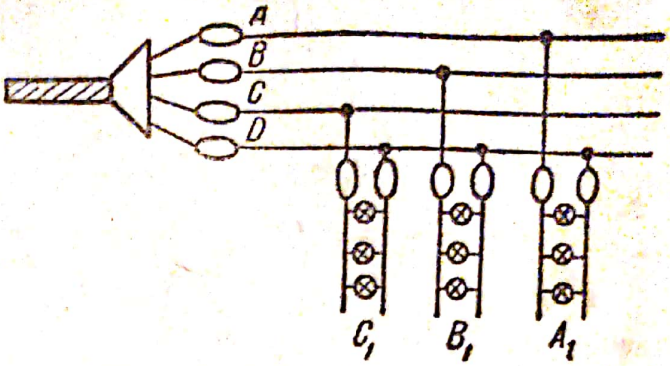


Fig. 6.10

consumatoare numai prin trei conductoare, ceea ce reprezintă mare economie de material conductor.

Tensiunile dintre începutul fazelor A, B ori C și punctul neutru se numesc *tensiuni pe fază* U_f. Tensiunea pe fază reprezintă tensiunea dintre un conductor de linie și firul neutru sau pămînt. Tensiunile dintre începutul a două faze, adică dintre A și B, dintre B, C și dintre C,A se numesc *tensiuni de linie* U_l. Tensiunea de linie este de fapt o tensiune între faze și reprezintă tensiunea dintre două conductoare de linie. Tensiunea de linie U_l între punctele A și B este egală cu diferența dintre tensiunile pe fază U_A și U_B, fiecare egală cu U_f, dar decalate cu $\frac{2\pi}{3}$ una față de alta. Reprezentarea prin fazori a tensiunilor pe fază (fig. 6.9): U_A și U_B dă tensiunea de linie U_l ca diferență *vectorială*: $U_l^2 = U_f^2 + U_f^2 - 2U_f^2 \cos\frac{2\pi}{3} = 2U_f^2 + 2U_f^2 \cos\frac{\pi}{3} = 2U_f^2 + + U_f^2 = 3U_f^2$; rezultă că:

$$\boxed{U_l = \sqrt{3}U_f,} \qquad (1)$$

adică *la montajul în stea tensiunea de linie este egală cu* $\sqrt{3}U_f$, *iar curentul de linie este egal cu curentul pe fază.*

Partea a doua a concluziei precedente reiese din figura 6.7, unde se observă că înfășurarea fazei este în serie cu conductorul de linie. Rețeaua de iluminat are tensiunea pe fază $U_f = 220$V. Tensiunea de linie U_l va fi deci $U_l = \sqrt{3} \cdot 220 = 1{,}73 \cdot 220 = = 380{,}6$ V. Montajul în stea este utilizat mai ales la instalațiile electrice de iluminat interior (fig. 6.10) al clădirilor. Se caută ca sarcina pe cele trei faze să fie cît mai apropiată de egalitate. Întrucît în asemenea instalații sarcinile nu pot rămîne tot timpul egale, se pune și conductorul neutru, prin care trece curentul de egalizare. El este făcut dintr-un fir mai subțire decît conductoarele de linie.

6.8. **Montaj în triunghi.** Al doilea montaj pentru generatoarele de curent trifazat este montajul în triunghi, care reduce numărul de conductoare la 3. Pentru aceasta se unesc bornele A cu Z, B cu X și C cu Y. În acest mod, sfîrșitul unei faze se leagă

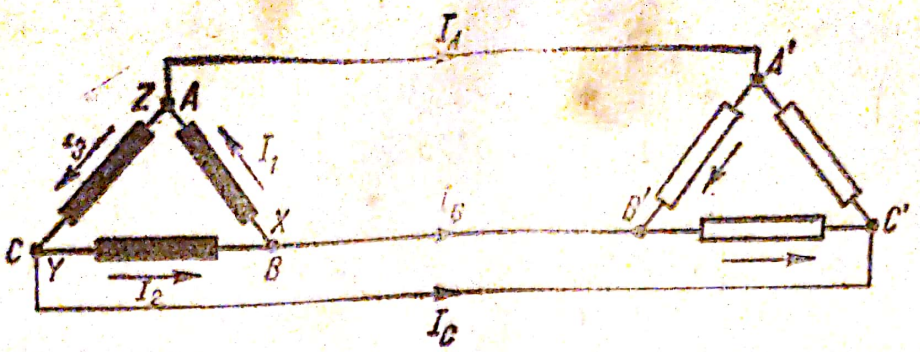


Fig. 6.11

cu începutul fazei următoare, din care rezultă montajul în triunghi (fig. 6.11). Se observă că tensiunea pe fază U_f dintre AB, BC, ori CA este aceeași cu tensiunea de linie U_l, dintre două conductoare de linie AA' și BB', BB' și CC' ori CC' și AA'. Deci $U_f = U_l$. În fiecare vîrf, de exemplu BX se ramifică trei curenți I_1, I_2 în faze (înfășurările generatorului) și $I_B = I_l$ în linie.

Potrivit legii întîi a lui Kirchhoff, aplicată unui vîrf (nod) și ținînd seamă de defazări, se poate scrie: $I_l = I_2 - I_1$. Diferența se poate face cu ajutorul diagramei fazoriale (fig. 6.12):

$$I_l^2 = I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2 \cos\frac{2\pi}{3}.$$

Dar $I_1 = I_2 = I_f$, ca modul, iar $\cos\frac{2\pi}{3} = -\cos\frac{\pi}{3} = -\frac{1}{2}$, deci:

$$\boxed{I_l = \sqrt{3}I_f.} \qquad (2)$$

Așadar:

La montajul în triunghi tensiunea de linie este egală cu tensiunea pe fază $U_l = U_f$, iar curentul de linie este egal cu curentul de fază, înmulțit cu $\sqrt{3}$ adică $I_l = I_f\sqrt{3}$.

Conectarea consumatoarelor se poate face, de asemenea, în stea ori triunghi, după condițiile locale, independent de montajul generatorului. Cînd sistemul trifazat nu este echilibrat, calculele devin mai complicate, dar ele nu intră în preocupările noastre, fiind probleme de electrotehnică.

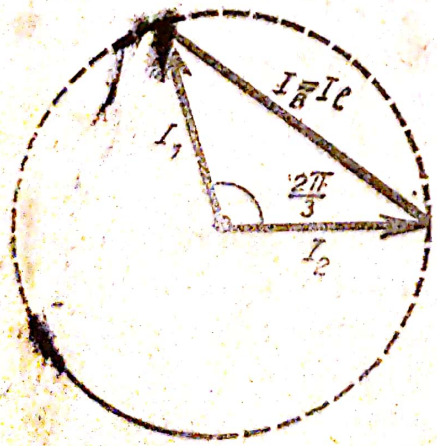


Fig. 6.12

6.9. **Puterea și energia în curent trifazat.** Puterea în curent alternativ monofazat este (§ 5.10) dată de relația $P = UI\cos\varphi$, unde φ este defazajul dintre tensiune și intensitate. Legea conservării energiei cere ca puterea medie a sistemului trifazat să fie egală cu suma puterilor medii ale fiecărei faze, adică $P = 3UI\cos\varphi$, U și I fiind tensiunea și intensitatea pe fază.

Scanned with OKEN Scanner

În montajul stea echilibrat $U_f = U_l \frac{1}{\sqrt{3}}$ și $I_f = I_l$, deci:

$$P = 3\frac{U_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi = \sqrt{3}\ U_l I_l \cos \varphi.$$

În montajul triunghi echilibrat $U_f = U_l$ și $I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$, de unde:

$$P = 3U_l \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi.$$

În concluzie, puterea sistemului trifazat este dată de relația:

$$\boxed{P = \sqrt{3}\ U_l I_l \cos \varphi} \qquad (3)$$

independent de montajul generatorului. S-a exprimat puterea în funcție de U_l și I_l, deoarece numai aceste mărimi sînt accesibile măsurării într-un punct oarecare al liniei. Ca și la curentul monofazat puterea activă se măsoară în watt, iar puterea aparentă $P_a = \sqrt{3} U_l I_l$ se măsoară în unitatea numită voltamper, VA. *Puterea reactivă* $P_r = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi$ *și se măsoară în unitatea numită var (voltamper reactiv.)*

Energia se va calcula cu ajutorul cunoscutei formule:
$W = Pt = \sqrt{3} U_l\ I_l t \cos \varphi$ și se va măsura în joule sau se va transforma în kWh.

6.10. **Motor asincron.** Cele mai răspîndite motoare electrice sînt motoarele asincrone, trifazate. Ele se folosesc în întreprinderile din toate ramurile industriale, fiind motoare de acționare a tot felul de mașini. Ca orice mașină rotativă se compune din două părți: statorul și rotorul. Statorul este format dintr-o carcasă cilindrică făcută din tole de oțel. Pe fața lui interioară sînt fixate bobinele inductoare, avînd conductoarele paralele cu axul. În aceste conductoare circulă curentul trifazat de excitație primit de la o rețea trifazată. Curentul trifazat de excitație generează cîmp magnetic învîrtitor, care se rotește cu viteză unghiulară constantă. Cele trei bobinaje ale statorului se pot lega în stea sau în triunghi, cum s-a văzut înainte.

Rotorul este un cilindru din tole de fier, avînd la margine crestături de-a lungul generatoarelor. În ele se află conductoare de cupru, avînd capetele unite prin inele metalice, formînd un *rotor în scurtcircuit numit „colivie de veveriță"* (fig. 6.13). Liniile cîmpului învîrtitor produs de stator induc în conductoarele rotorului t.e.m. care vor produce curenți electrici. Acțiunea reciprocă dintre curentul din conductorul rotorului și cîmpul magnetic învîrtitor va produce forțe electromagnetice. Acestea vor da naștere unui cuplu de forțe, care va roti rotorul în sensul de rotație a cîmpului învîrtitor.

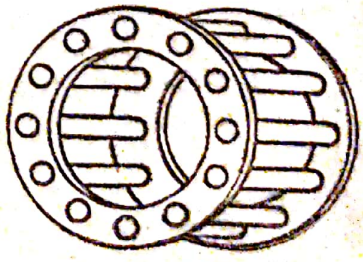


Fig. 6.13

Energia electrică se transformă în energie mecanică. Viteza de rotație a rotorului este mai mică decît viteza de rotație a cîmpului învîrtitor din stator. De aceea, motorul se numește motor asincron. Viteza de rotație a rotorului nu poate ajunge niciodată la viteza de rotație a cîmpului magnetic învîrtitor (numită și viteză de sincronism), deoarece în acest caz liniile cîmpului magnetic învîrtitor nu ar mai tăia conductoarele statorului și nu s-ar mai induce t.e.m. în rotor, adică motorul n-ar funcționa. Dacă viteza de rotație a rotorului scade, va crește viteza relativă a conductoarelor rotorului față de cîmpul învîrtitor, crește t.e.m. indusă, deci curentul din rotor, ceea ce are ca urmare creșterea vitezei rotorului la valoarea de regim. Motorul asincron are construcție foarte simplă, pornește singur din repaus și nu are contacte alunecătoare, care să producă scîntei; din aceste cauze motorul asincron are o foarte largă întrebuințare în practică, la acționarea diferitelor mașini și unelte.

B. Mașini de curent continuu

6.11. Principiul generatorului de curent continuu. Într-o spiră care se rotește într-un cîmp magnetic ia naștere o tensiune electromotoare alternativă (§ 5.1). Dacă cele două capete ale spirei sînt legate la cîte un inel, pe care apasă cîte o perie, pusă în legătură cu un circuit exterior, prin acesta va circula curent alternativ.

Problema care se pune este de a face ca în circuitul exterior să circule un curent în același sens, adică de a redresa curentul alternativ din spira rotitoare. Pentru aceasta se înlocuiesc cele două inele prin unul singur, secționat în două jumătăți C_1 și C_2, izolate una de alta (fig. 6.14). Aceste jumătăți de inel se numesc lamele colectoare, iar împreună formează colectorul. Pe colector se sprijină periile P_1 și P_2. Periile sînt fixe și solidare cu circuitul exterior; lamelele sînt legate de capetele spirei rotitoare S. Colectorul are rolul de redresor mecanic cum se poate observa, urmărind procesele ce se produc la rotirea completă a unei spire cu colector (fig. 6.15). În prima poziție a spirei (fig. 6.15, *a*), conductoarele care formează spira nu taie liniile cîmpului și în spiră nu se induce t.e.m. În poziția *b* cele două conductoare taie un număr maxim de linii de cîmp în unitatea de timp, deci în spiră se induce o t.e.m. maximă E_m, care are sensul înspre

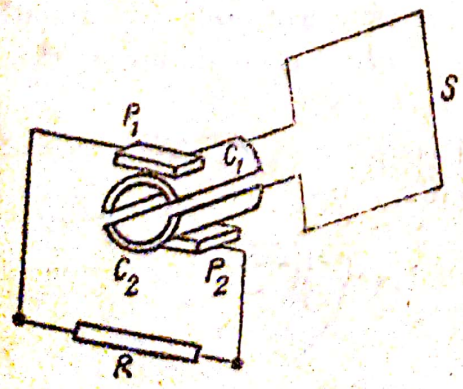


Fig. 6.14

Scanned with OKEN Scanner

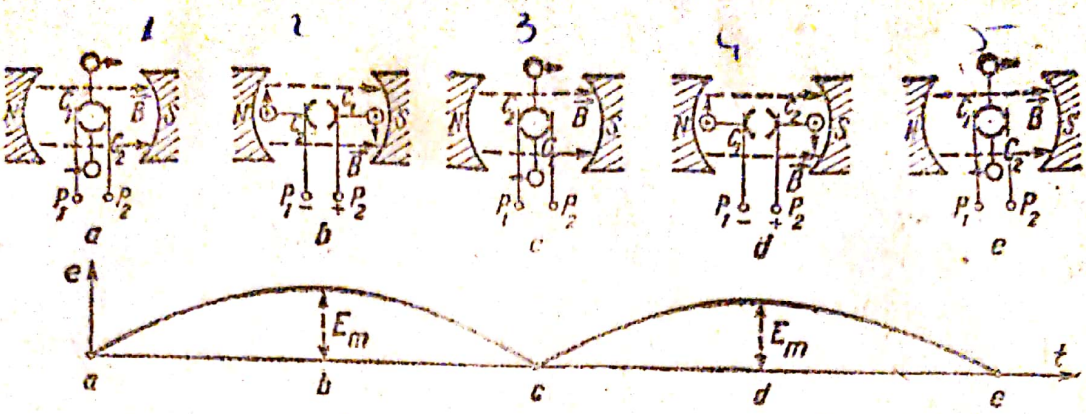


Fig. 6.15

lamela C_1 și dinspre lamela C_2. Lamela C_1 se află sub peria P_2, de unde curentul trece, prin rezistența exterioară, la peria P_1. Cînd spira ajunge în poziția *c*, t.e.m. indusă este nulă. În poziția *d*, t.e.m. indusă este maximă E_m și are sensul către lamela C_2, adică în spiră curentul are sensul opus aceluia din spiră din poziția *b*. Lamela C_2 a ajuns însă sub peria P_2, deci prin rezistorul exterior *R*, curentul circulă tot de la peria P_2 către P_1.

Prin circuitul exterior circulă un curent continuu pulsant (cum se vede în graficul din figura 6.15) *în timp ce în spiră ia naștere curent alternativ*. Colectorul joacă rol de redresor mecanic.

6.12. **Construcția și funcționarea mașinilor de curent continuu.** Orice mașină de curent continuu (generator sau motor) are trei părți principale: inductor *(a)*, indus și colector *(b)* (fig. 6.16).

Inductorul este stator și este format din una sau mai multe perechi *p* de poli, fixate pe carcasa mașinii (fig. 6.16, *a*) Polii sînt formați din electromagneți, prin înfășurarea cărora trece curentul de excitație. Inductorul produce fluxul magnetic inductor. Excitația inductorului poate fi de două feluri: *excitația independentă*, atunci cînd curentul de excitație este furnizat de o sursă separată de energie electrică sau *excitație proprie (autoexcitație)*, cînd curentul de excitație este furnizat chiar de generatorul însuși.

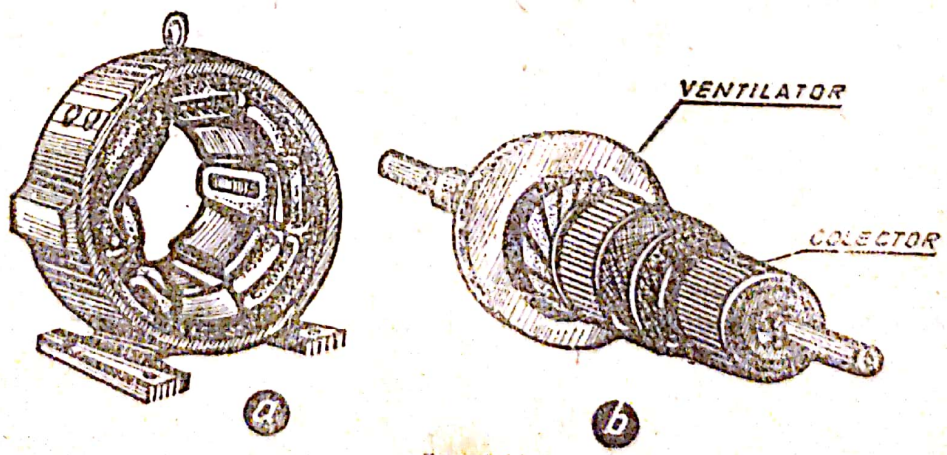


Fig. 6.16

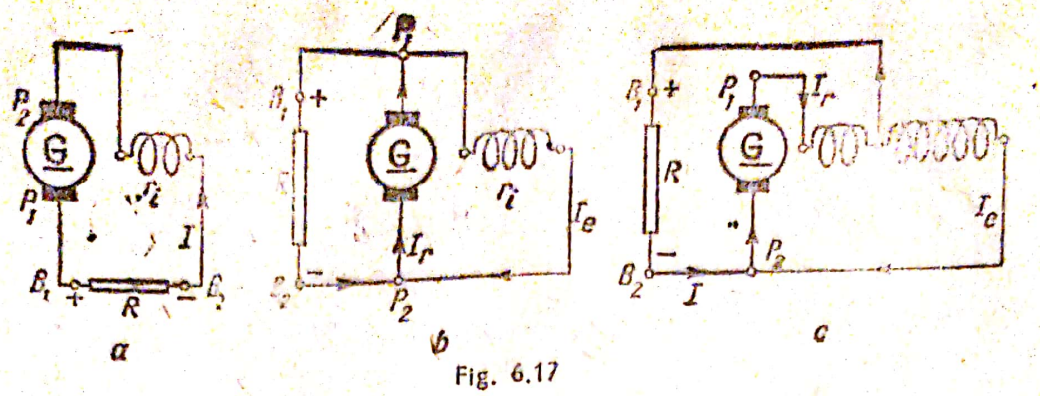


Fig. 6.17

Sînt trei feluri de excitație proprie: *în serie*, cînd întregul curent produs de mașină trece prin circuitul de excitație (fig. 6.17, *a*) legat în serie cu indusul; *în derivație* sau *șunt*, cînd circuitul de excitație (fig. 6.17, *b*) este legat în paralel cu indusul, deci numai o parte mică din curentul generat în indus trece prin circuitul de excitație; *mixtă* sau *compound*, cînd are ambele feluri de excitație (fig. 6.17, *c*). Dinamul cu autoexcitație serie are înfășurările electromagneților (în scheme am reprezentat numai unul din poli) din sîrmă groasă și spire puține, deoarece prin ele circulă curentul total generat. La autoexcitația șunt înfășurările electromagneților au spire multe din sîrmă subțire, ca să circule prin ei curenți slabi.

Indusul este rotor (fig. 6.16, *b*) și are forma unui cilindru făcut din tole subțiri de oțel, izolate între ele, pentru a împiedica formarea curenților turbionari. Pe suprafața cilindrică a rotorului cilindric (tobă) se fac niște crestături de-a lungul generatoarelor, în care se așază conductoarele care formează înfășurarea indusului. În aceste conductoare ia naștere t.e.m. indusă. Înfășurarea indusului este legată la colector. Rotorul este pus în mișcare de rotație de către un motor exterior, de exemplu, motor Diesel sau o turbină.

Colectorul (fig. 6.16, *b*) se așază pe același ax cu rotorul (indusul) și este format din mai multe lamele colectoare din cupru, izolate una de alta. Pe lamele, diametral opuse, calcă periile făcute din cărbune, grafit sau cupru. Ele sînt fixate de portperii, care la rîndul lor sînt fixate de carcasă. Periile culeg curentul din bobine, prin lamelele colectoare. O bobină cu două lamele produce un curent pulsant (fig. 6.15). Acest curent pulsant are mereu același sens, dar variază între zero și valoarea maximă, ceea ce nu-l face propriu utilizărilor practice. De aceea, pe rotor se înfășoară multe bobine — în figura 6.18 sînt două — legate de multe lamele colectoare, așa fel încît la o rotație completă se produc multe t.e.m. în impulsuri defazate între ele. Periile culeg și dau la bornele mașinii în fiecare moment o t.e.m. rezultantă, practic continuă (fig. 6.19).

Dinamul transformă energia mecanică transmisă de motor rotorului în energie electrică. Randamentul său industrial este egal cu raportul dintre puterea electrică generată la bornele sale și puterea P a motorului care îl acționează:

$$\eta = \frac{U_B \cdot I}{P}. \qquad (1)$$

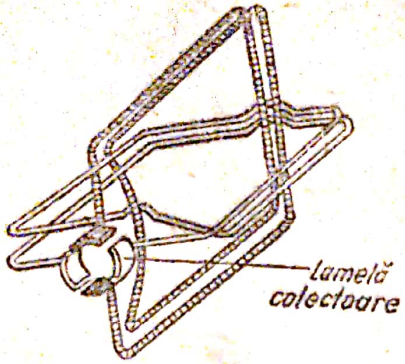


Fig. 6.18

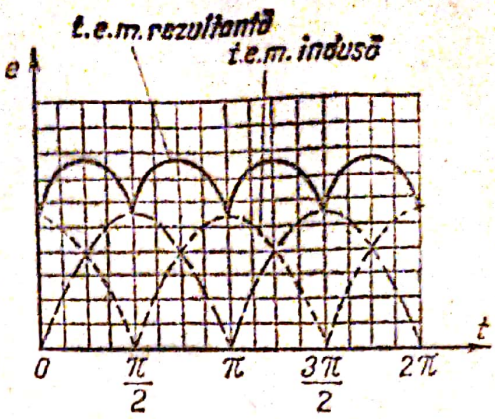


Fig. 6.19

Tensiunea electromotoare E produsă de un dinam este proporțională cu numărul de spire N ale rotorului, cu valoarea Φ a fluxului magnetic produs de inductor și cu numărul de rotații pe secundă ale rotorului:

$$E = KN\Phi\nu, \tag{2}$$

unde K este un coeficient care depinde de construcția mașinii. Din această t.e.m., o parte acoperă căderile interioare de tensiune și restul ajunge la borne, ca tensiune la borne U_B ori simplu U. În cazul dinamului serie (fig. 6.17, *a*) tensiunea la borne va fi:

$$U = E - (r + r_i)I, \tag{3}$$

în care r reprezintă rezistența rotorului, r_i rezistența înfășurării electromagneților inductorului, iar I este intensitatea curentului din consumatorul R. În cazul dinamului șunt (fig. 6.17, *b*) tensiunea la borne va fi în același timp și tensiune la perii și cădere de tensiune pe înfășurările inductorului:

$$U = E - rI_r = r_i I_e, \tag{4}$$

unde s-a notat prin I_r curentul din rotor și prin I_e curentul din electromagneții inductorului. Se observă ușor că la peria P_2 sau P_1 (fig. 6.17, *b*) legea I a lui Kirchhoff dă:

$$I_r = I + I_e. \tag{5}$$

6.13. **Reversibilitatea mașinilor de curent continuu.** Ca orice mașină electrică rotativă, mașina de curent continuu este reversibilă (§ 6.5). Dacă rotorul este acțio-

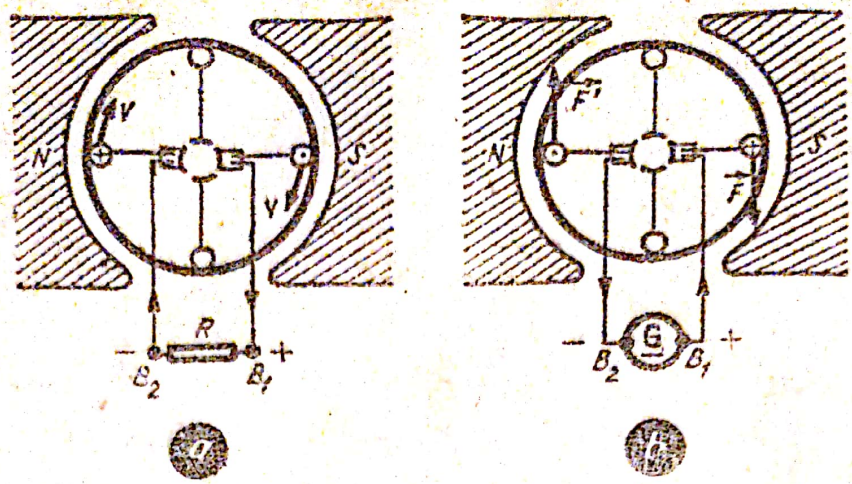


Fig. 6.20

nat de un motor și este învîrtit în sensul indicat (fig. 6.20, *a*) în conductoarele lui se induce o t.e.m. care produce curentul continuu cu sensul de la B_1 către B_2 prin consumatorul R. Se decuplează motorul, iar la bornele mașinii B_1B_2 (fig. 6.20, *b*) se conectează un generator G de tensiune continuă U, menținînd polaritatea anterioară. Prin conductoarele rotorului trece curent în sensul indicat pe figură. Acest curent interacționează cu cîmpul magnetic inductor și ia naștere un cuplu de forțe electromagnetice FF', care pune rotorul în mișcare de rotație: mașina electrică funcționează ca motor. Tensiunea U aplicată la borne trebuie să echilibreze căderea interioară de tensiune rI și tensiunea contraelectromotoare E_c din rotor. Tensiunile contraelectromotoare E_c iau naștere în conductoarele rotorului, care taie liniile cîmpului magnetic inductor. Așadar:

$$\boxed{U = E_c + rI,} \tag{6}$$

unde s-a notat prin r rezistența interioară a mașinii electrice.

6.14. **Motorul de curent continuu.** Este alimentat la o rețea de curent continuu, cu o tensiune egală cu tensiunea pe care ar genera-o, dacă ar funcționa ca generator. Pentru a inversa sensul de rotație a electromotorului se inversează sensul curentului de excitație. La pornire, tensiunea contraelectromotoare E_c este nulă, de aceea curentul de pornire I_p va fi:

$$I_p = \frac{U}{r},$$

cam de 10 ori mai mare decît valoarea lui normală, deoarece r este foarte mică. Pentru a evita deteriorarea înfășurărilor de către un asemenea curent intens, se leagă în serie cu indusul un reostat de pornire, de rezistență R_p (fig. 6.21). Inițial

cursorul C este la capătul A, adică în circuit este introdusă toată rezistența reostatului, deci

$$I_p = \frac{U}{r + R_p}.$$

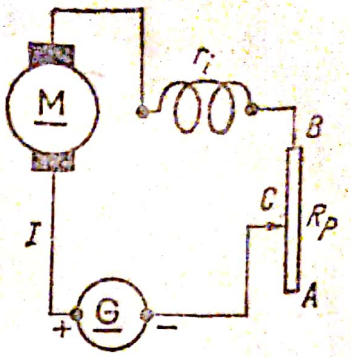


Fig. 6.21

Turația motorului crește, deci crește și E_c și în consecință rezistența reostatului este micșorată pînă la anulare, prin deplasarea cursorului către B. Ca și generatoarele, motoarele de curent continuu pot fi cu excitație serie, șunt sau mixtă. Motoarele serie au turație variabilă, de aceea sînt utilizate la tracțiunea electrică: motoare de tramvaie, troleibuse, locomotive sau la instalații de ridicat (macarale). Motoarele șunt au turație constantă, de aceea sînt folosite la pompe, ventilatoare, mașini-unelte etc. Un exemplu de folosire a motorului de curent continuu cu excitație în serie îl găsim la locomotiva Diesel-electrică de 2 100 CP, fabricată la Uzinele „Electroputere" din Craiova. În principiu, o asemenea locomotivă este formată dintr-un motor Diesel, cuplat cu un dinam. Curentul electric produs este trimis la șase motoare electrice de tracțiune. Motoarele sînt de curent continuu, cu excitație în serie și sînt cuplate cu osiile motoare ale locomotivei. Randamentul locomotivei Diesel-electrică este de aproape patru ori mai mare decît al locomotivelor cu aburi, prezentînd și alte avantaje ca: simplitate de conducere, rază de acțiune mai mare, siguranță în funcționare, economii în exploatare și condiții de muncă ale personalului mult îmbunătățite.

Întrebări, exerciții, probleme

1. Care este principiul unui alternator?
2. În ce constă sincronismul mașinilor electrice?
3. Să se compare montajul stea cu montajul triunghi.
4. În ce constă cîmpul învîrtitor?
5. Să se compare motorul sincron cu motorul asincron.
6. Să se explice cum apare curentul continuu în circuitul exterior, în timp ce în înfășurarea dinamului ia naștere curent alternativ.
7. Să se explice cum se obține curent continuu cu pulsații foarte mici.
8. Să se explice autoexcitația mașinilor de curent continuu.
9. Rotorul unui generator de curent alternativ face 375 rot/min, iar generatorul are opt perechi de poli. Se cer frecvența și perioada t.e.m. generate?

Răspuns: 50 Hz; 0,02 s.

10. Un generator cu 12 perechi de poli trebuie să genereze un curent cu frecvența de 50 Hz. Care este turația rotorului său?

Răspuns: 250 rot/min.

11. Un dinam cu excitația serie produce un curent de 10 A, cu t.e.m. de 200 V. Rotorul are rezistență de 5 Ω, iar inductorul de 6 Ω. Se cer tensiunea la perii și tensiunea la borne.

Răspuns: 150 V; 90V.

Scanned with OKEN Scanner

12. Rotorul unui dinam șunt produce o t.e.m. de 120 V, iar intensitatea în circuitul exterior este de 30 A; intensitatea în inductor este de 1,5 A, iar rotorul are rezistența de 0,2 Ω. Se cer: tensiunea la borne și rezistența inductorului.

Răspuns: 113,7 V; 75,8 Ω.

13. Un dinam șunt furnizează un curent de sarcină de 48 A, sub tensiunea de 115 V. Rezistența indusului este de 0,16 Ω, iar curentul de excitație are 2 A. Se cer t.e.m. a generatorului și rezistența inductorului.

Răspuns: 123 V; 57,5 Ω.

14. Un motor electric are rezistența inductorului și a rotorului de 0,7 Ω, tensiunea la borne de 200 V, iar curentul de alimentare are 32 A. Se cere t.c.e.m.

Răspuns: 177,6 V.

15. Un motor electric are tensiunea la borne de 120 V, iar t.c.e.m. de 100 V. Care este randamentul său electric?

Răspuns: 83%.

16. Un motor de 5,4 kW și 220 V are rezistența rotorului de 0,6 Ω și randamentul electric 90%. Se cer: curentul absorbit în funcționarea normală, t.c.e.m., rezistența reostatului de pornire pentru ca la pornire curentul să fie de 40 A.

Răspuns: 27,2 A; 198 V; 4,9 Ω.

Scanned with OKEN Scanner

7. Transformatoare

7.1. **Principiul transformatorului.** O problemă importantă a electrotehnicii este transportul economic al energiei electrice de la locul de producere la consumatori, pe distanțe mari. Pentru o anumită putere electrică de transportat ($P = UI$), randamentul este cu atît mai mare cu cît U este mai mare și ca urmare, I mai mic. În centralele electrice tensiunea produsă de alternatoare are 6 000 V. Transportul economic necesită 60...200 kV. La locul de consumare însă, energia electrică trebuie să aibă o tensiune joasă, pentru a nu fi periculoasă utilizarea ei curentă. Este necesară deci transformarea energiei electrice de o anumită tensiune în energie electrică de altă tensiune. Această problemă se rezolvă simplu și economic numai la curentul alternativ, cu ajutorul transformatorului. Acesta este un aparat electromagnetic static, care transformă elementele puterii U și I pe baza fenomenului de inducție electromagnetică. O experiență simplă ne demonstrează principiul transformatorului. Pe un miez din fier cu circuit magnetic închis (fig. 7.1) se așază două bobine de cîte 600 spire. Prima bobină L_1 este conectată la un sistem punte, alimentat la o tensiune continuă de la un acumulator de 6...8 V. Sistemul punte este format din două reostate, cu cursor R_1 și R_2, avînd cursoarele C_1 și C_2 așezate la mijlocul fiecărui reostat. Bobina L_1 care primește energia se numește bobină primară; bobina L_2 care furnizează energie

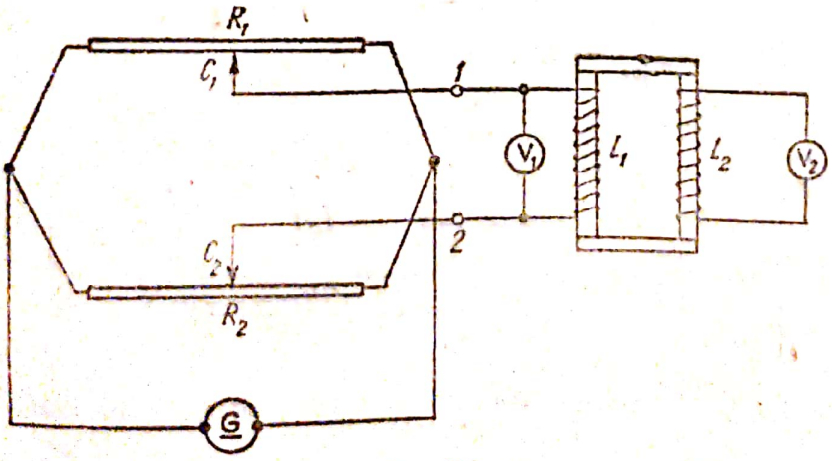


Fig. 7.1

se numește bobină secundară. Cursorul C_1 rămînind fix la mijlocul lui R_1, cursorul C_2 este mișcat alternativ, de o parte și de alta a mijlocului lui R_2: *tensiunea alternativă produsă la bornele lui L_1 se transmite prin inducție electromagnetică în secundar L_2* și acționează acul indicator al voltmetrului V_2. Așezînd cele două voltmetre V_1 și V_2 alături se observă și un defazaj de 180° între tensiunile din primar și secundar. Experiența se repetă apoi, obținînd rezultate mai convingătoare cu o tensiune alternativă de 4 V, conectată la bornele 1—2 îndepărtînd sistemul în punte.

7.2. **Construcția și funcționarea transformatorului monofazat.** Transformatorul este un aparat electric static format din două bobine — primară și secundară. Acestea sînt așezate pe același miez divizat, din fier și siliciu, pentru a micșora pierderile prin curenți turbionari și prin histerezis. Cele două bobine sînt deci cuplate prin cîmpul de inducție magnetică ce se produce în miezul de fier și siliciu.

Tensiunea alternativă U_1 aplicată bobinei primare (fig. 7.2) produce în aceasta un curent alternativ, care, la rîndul său, generează în miez un flux de inducție magnetică*, de asemenea alternativ, avînd valoarea instantanee Φ. Acest flux variabil induce în bobina secundară o t.e.m. e_2. El induce totodată și în primar o t.e.m. autoindusă e_1, defazată cu unghiul π în urma lui U_1:

$$e_1 = -U_1.$$

T.e.m. indusă în bobina secundară e_2, este în fază cu e_1, deci defazată cu unghiul π în urma lui U_1. Acest lucru se poate demonstra cu experiența lui Thomson (§ 4.3), inelul de aluminiu fiind secundarul, format dintr-o singură spiră. Azvîrlirea inelului dovedește că în secundar și primar curenții sînt de sens contrar. Dacă circuitul secundar este deschis — este fără consumator la bornele secundarului — se spune că *transformatorul funcționează în gol*. În acest caz $I_2 = 0$, în circuitul secundar nu se produce cădere interioară de tensiune și $e_2 = U_2$ și în fază una cu aceasta.

Variația fluxului de inducție Φ induce într-o spiră o tensiune $e = -\frac{d\Phi}{dt}$. În cele N_1 spire ale primarului va induce tensiunea:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -U_1,$$

iar în secundar:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = U_2.$$

Prin împărțire:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = -\frac{U_1}{U_2}.$$

Așadar, în valoare absolută:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K.}$$

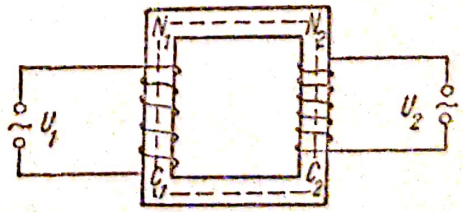


Fig. 7.2

* Fluxul de inducție este practic în întregime concentrat în interiorul miezului. Se realizează un cuplaj maxim.

** Semnul minus arată că tensiunile electromotoare e_1 și e_2 sînt în opoziție de fază.

Scanned with OKEN Scanner

● La mersul în gol al transformatorului, tensiunile sînt proporționale cu numărul de spire al bobinelor respective.

Raportul K se numește raportul de transformare. Cînd $K > 1$, $U_2 < U_1$, transformatorul se numește coborîtor de tensiune. Transformatorul furnizează aceeași putere electrică, curentul avînd aceeași frecvență, dar cu o tensiune mai mică decît cea primită de la rețea. Cînd $K < 1$, $U_2 > U_1$, transformatorul este ridicător de tensiune. Cînd $K = 1$, $U_2 = U_1$, iar transformatorul servește la separarea electrică a circuitelor, ele rămînînd cuplate inductiv, adică prin cîmp magnetic.

Dacă circuitul secundar este închis printr-un rezistor consumator, de rezistență R_2, în secundar apare I_2. În acest caz $U_2 \approx e_2$, deoarece se produce cădere de tensiune în secundar. Abaterea este mică, pierderile sînt mici, încît randamentul transformatorului este de 95—98%. Se poate deci practic considera că puterea din primar P_1 și cea din secundar P_2 sînt egale:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

de unde:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}.}$$

Pierderile de energie în transformator provin mai întîi din fenomenul de histerezis, prin care se transformă energie electrică în energie termică la inversarea magnetizării; apoi prin curenții Foucault. Aceste pierderi se reduc foarte mult folosind tole subțiri din fier cu siliciu. Pentru transformatoarele de înaltă frecvență din radiotehnică se folosesc miezuri din pulberi de fier, aglomerate și izolate între ele printr-un liant izolator. De asemenea se folosesc miezuri din ferită (oxizi de fier cu alți oxizi), care au permeabilitatea relativă mare și conductibilitate mică. Se mai produc pierderi în înfășurări prin efect Joule. Transformatoarele de mare putere (v. planșa, fotografia 4) sînt răcite în băi de ulei sau alte dispozitive speciale.

7.3. Experiențe cu transformatoare. a. *Ridicarea tensiunii.* Primarul (L_1), de 300 spire, este conectat la o tensiune alternativă U_1 de 10...20 V, de la un dispozitiv potențiometric R, alimentat la rețea. În circuitul secundarului (L_2) se montează o lampă cu neon Ne (fig. 7.3). Bobina secundară are 1 200 de spire. La închiderea circuitului, lampa cu neon luminează. Conectată direct la bornele primarului 1—2, ea nu luminează, tensiunea U_1 fiind mai mică decît cea necesară. Deci $U_2 > U_1$.

b. *Coborîrea tensiunii.* În montajul din figura 7.4, primarul transformatorului, L_1, introdus pe o ramură a miezului de fier divizat, are 1 200 de spire, iar secundarul L_2,

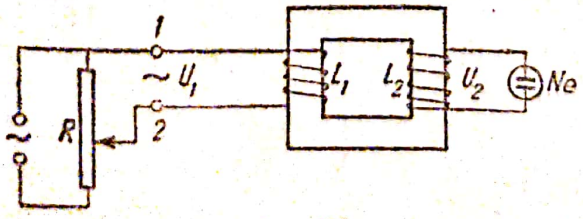


Fig. 7.3

Fig. 7.4

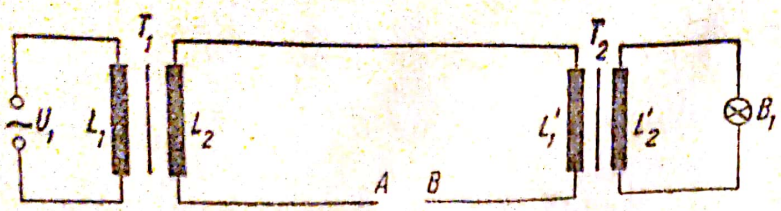


Fig. 7.5

introdus pe cealaltă ramură a miezului, are 10—20 spire. Circuitul secundarului se închide prin beculeţul B de 6 V. La închiderea întrerupătorului K, becul luminează normal, deşi conectat la tensiunea U_1 din primar, 220 V, s-ar fi ars imediat. În acelaşi montaj se înlocuieşte bobina L_2 de 20 spire, cu alta de 2—4 spire şi se închide circuitul secundar printr-un cui cu diametrul de 2—3 mm: după scurt timp se înroşeşte şi se topeşte. Tensiunea a coborît de ≈ 300 ori, iar intensitatea în secundar a crescut de acelaşi număr de ori, ceea ce duce la topirea cuiului. Pe acest principiu se bazează funcţionarea transformatorului pentru topit metale, pentru sudură prin puncte sau transformatorul de sonerie.

c. *Transportul energiei electrice la distanţă.* Se poate demonstra principiul acestui transport făcînd montajul din figura 7.5. U_1 reprezintă tensiunea alternatorului de la centrala electrică (în cazul nostru tensiunea la reţea). T_1 este transformatorul ridicător de tensiune (L_1 de 600 spire, L_2 de 1 200 spire), iar T_2 este transformatorul coborîtor de tensiune la locul de consum (L_1' de 12 000 spire, L_2' de 600 spire). B_1 este un bec de 220 V şi reprezintă consumatorul. Firele de legătură între T_1 şi T_2 sînt foarte subţiri şi lungi de cîţiva metri. Unul dintre ele este întrerupt (A—B), unde se formează un descărcător de cîţiva milimetri. Poate fi înlocuit cu un rezistor de rezistenţă 10 kΩ iar firul să nu fie întrerupt. La închiderea circuitului primar sar scîntei între A—B, dovedind că pe linia de transport tensiunea este mare (circa 4 000 V), iar becul B_1 luminează ca la 220 V.

7.4. **Bobina de inducţie.** Este un transformator alimentat cu curent continuu pulsant. A fost construită de Ruhmkorff (1851). *Variaţiile de flux magnetic se obţin prin întreruperea periodică a curentului primar*, cu ajutorul unui vibrator, la fel ca la soneria electrică. În jurul unui miez M făcut dintr-un fascicul de fire de fier izolate (fig. 7.6) este înfăşurarea primară P din sîrmă groasă şi scurtă, alimentată cu curent continuu de tensiune U mică, 4...8 V. Întreruperea şi restabilirea periodică a curentului primar o face vibratorul V. Deasupra înfăşurării primare şi izolată de ea, se află înfăşurarea secundară S, formată din multe mii de spire din sîrmă foarte subţire. La trecerea curentului primar, miezul M se magnetizează, atrage armătura vibratorului şi întrerupe curentul; miezul de fier se demagnetizează şi armătura revine pe vîrful metalic, restabilind circuitul etc. Datorită autoinducţiei, curentul din

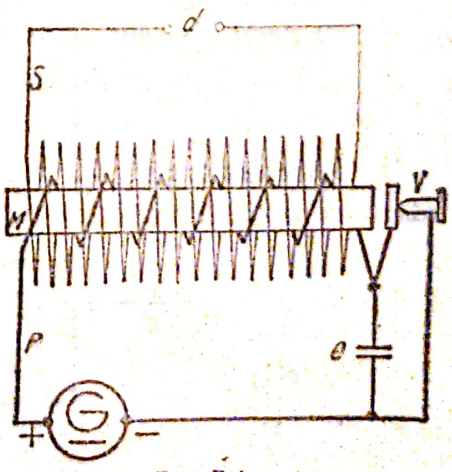


Fig. 7.6

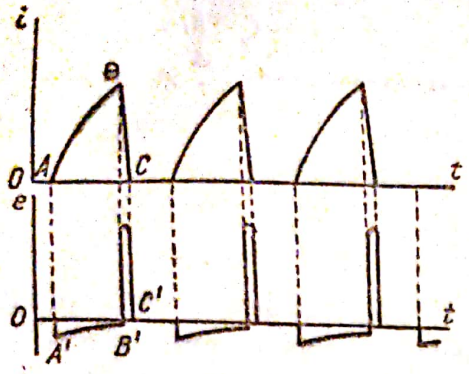


Fig. 7.7

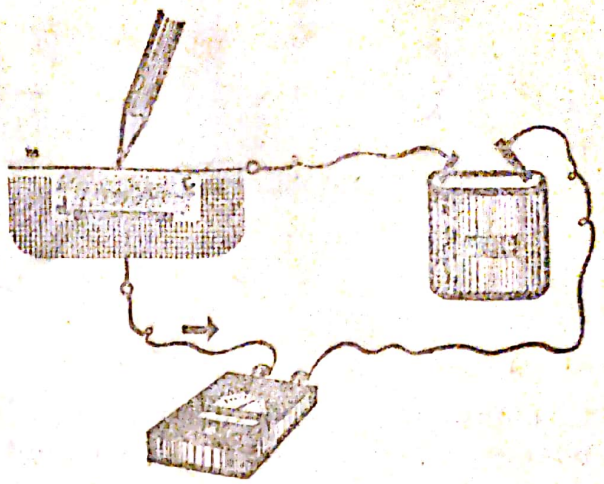


Fig. 7.8

primar crește relativ încet AB (fig. 7.7) la închiderea circuitului primar. În secundar se induce o tensiune $A'B'$, de sens opus și relativ mică. Întreruperea circuitului primar se face mai repede, deoarece condensatorul C (fig. 7.6) se încarcă și elimină scînteia care ar prelungi scăderea BC a curentului primar. Ca urmare, în secundar se induce o tensiune $B'C'$ mult mai mare și de același sens cu curentul din primar etc. Așadar, în secundar ia naștere o t.e.m. alternativă, nesinusoidală, avînd la întreruperea circuitului primar amplitudinea mult mai mare (10 kV...40 kV) decît la stabilirea lui. Dacă distanța d dintre bornele secundarului este mică, între ele sar scîntei. Crescînd treptat distanța d, la o anumită valoare d_1 va produce scîntei numai alternanța corespunzătoare întreruperii curentului primar, cealaltă nu, fiind mai mică. În acest caz, prin secundar se produce curent electric continuu pulsant, bobina funcționează ca transformator ridicător de tensiune cu polaritate neschimbată. Bobina Ruhmkorff se folosește la producerea radiațiilor Röntgen, la descărcările în gaze, la studiul oscilațiilor electrice, pentru a se obține tensiunea necesară scînteii la motoarele cu aprindere prin scînteie etc.

7.5. **Telefonul.** A fost inventat de Graham Bell (1847—1922), în 1875.

Se vorbește în fața unui mic aparat, numit microfon. Acesta se compune dintr-o cutie confecționată dintr-un material izolant (fig. 7.8), prevăzută la bază cu un mic disc metalic d, care constituie un contact electric. În cutie se află granule de cărbune c. Deasupra se găsește o membrană m din tablă subțire de oțel, așezată în așa fel încît suprafața ei să atingă ușor grăunții de cărbune din interior. Membrana m, împreună cu discul metalic d, constituie cei doi poli ai microfonului. Dacă se leagă microfonul cu o sursă de curent continuu și se intercalează în circuit un miliampermetru (fig. 7.8), atunci cînd vîrful creionului va apăsa pe membrană, se va constata la miliampermetru o variație a intensității curentului electric. Aceasta se explică astfel: cînd membrana stă nemișcată, curentul electric trece prin ea și prin grăunții de cărbune care au o anumită rezistență. Cînd membrana se mișcă, grăunții de cărbune se așază unul peste altul și rezistența electrică se modifică. Modificîndu-se rezistența electrică R, conform legii lui Ohm, curentul I se va modifica și el, deoa-

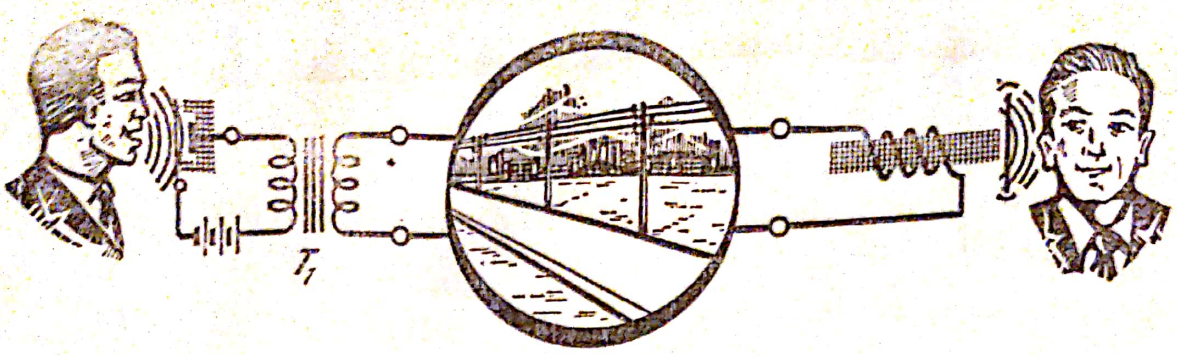


Fig. 7.9

rece tensiunea sursei a rămas aceeași. Dacă în loc de creion, membrana va fi apăsată de undele sonore provocate de vorbire, curentul electric va varia proporțional cu apăsarea. Curentul electric astfel variat poate fi trimis pe conductoare la distanță (linii telefonice fixate pe stîlpi). La capătul liniei, acolo unde urmează să se asculte ceea ce se vorbește în microfon, linia electrică se închide într-un electromagnet, care constituie receptorul (fig. 7.9).

Cînd se vorbește în fața microfonului, variațiile de curent, care se produc în urma vibrației membranei, sînt transmise pe linie și ajung la capătul celălalt, la receptor. Aici se află o bobină înfășurată pe un miez de oțel, iar în dreptul ei, o membrană. Variațiile de curent transmise în bobină vor produce o variație a inducției magnetice, ceea ce va face ca membrana receptorului să vibreze mai mult sau mai puțin, fiind atrasă de miez. Prin vibrațiile ei, membrana va mișca aerul, producînd sunete la fel cu cele vorbite în fața microfonului. Deci, în receptor se va auzi sunetul produs în fața microfonului. Pentru a nu se transmite în mod continuu un curent pe linie și pentru a se amplifica puțin vibrațiile de curent, se montează un transformator la plecare T_1, așa cum se vede în figura 7.9. În primarul transformatorului se află circuitul microfonului, iar în secundar, circuitul liniei.

Pentru a se putea transmite în ambele sensuri, se montează un microfon și un transformator și în stația unde era receptorul, iar acolo unde era microfonul, un receptor telefonic.

Construcția telefoanelor, precum și a centralelor telefonice, care fac legătura între abonați, s-a perfecționat mult, însă principiul a rămas același.

7.6. Magnetofonul. Este un aparat de înregistrare și redare a sunetelor pe baza fenomenelor de magnetizare și inducție electromagnetică. Părțile lui componente corespund celor trei funcții esențiale pe care trebuie să le îndeplinească: înregistrarea sunetelor, redarea lor, ștergerea înregistrării cînd nu mai este necesară.

Suportul pe care se înregistrează semnalele constă dintr-o bandă lată de cîțiva milimetri și groasă de cîteva sutimi de milimetru. Pe bandă se află un strat fin de substanță feromagnetică, care uneori este incorporată în toată masa benzii. Banda magnetică este înfășurată pe o rolă R_1 (fig. 7.10); o altă rolă R_2 antrenează banda prin fața dispozitivului de înregistrare I. Semnalele sînt înregistrate pe bandă prin fenomenul de magnetizare (remanență), de către un cap magnetic numit *cap de înregistrare* I.

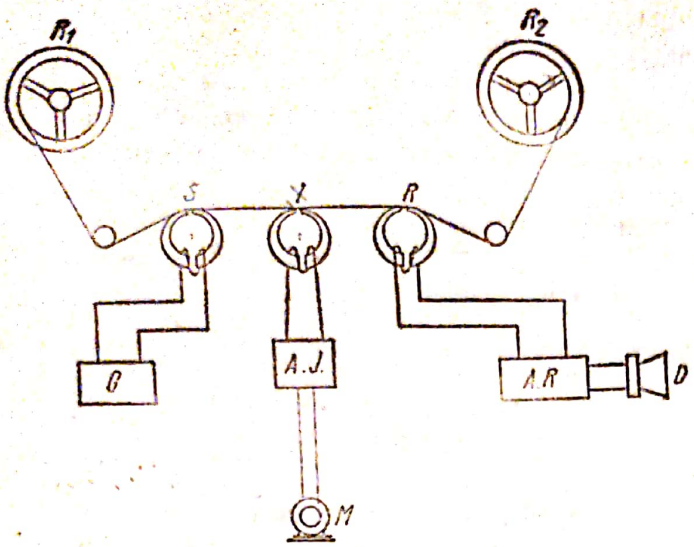


Fig. 7.10

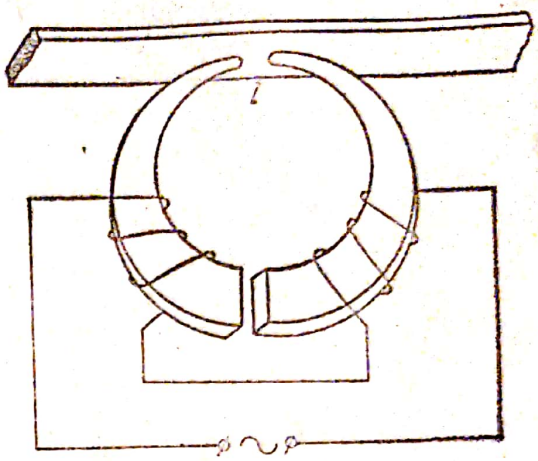


Fig. 7.11

Un cap magnetic este un electromagnet, în general toroidal, avînd circuitul magnetic din tole cu permeabilitate foarte mare, iar bobina cu un număr de spire determinat de rolul capului. Circuitul magnetic are un întrefier extrem de îngust (10—40 μm la înregistrare, 5—10 μm la redare) prin fața căruia trece purtătorul de semnale sonore (fig. 7.11). La înregistrare (fig. 7.10), semnalele sonore sînt transformate de un microfon, *M*, în modulații de curent, care sînt amplificate și aduse la înfășurarea capului de înregistrare. Variațiile cîmpului magnetic din întrefier magnetizează permanent banda care trece prin fața lui. Banda purtătoare a semnalului înregistrat magnetic trece prin fața *capului magnetic de redare R* (fig. 7.10). Cîmpul magnetic variabil al semnalului modulat și înregistrat pe bandă induce în bobina capului de redare o t.e.m. modulată și proporțională cu semnalul; aceasta este amplificată de amplificatorul de redare și acționează difuzorul *D*, în care se aude sunetul produs anterior în fața microfonului.

Capul magnetic de ștergere *S* (fig. 7.10) face să dispară înregistrarea magnetică de pe bandă, cînd devine inutilă și banda poate fi din nou utilizată. Ștergerea se face prin demagnetizarea bandei cu ajutorul unui curent alternativ de înaltă frecvență (30—50 kHz) produs de generatorul *G*. Cîmpul de înaltă frecvență supune banda, în trecere prin fața întrefierului său, unei succesiuni rapide de cicluri de magnetizare — demagnetizare, peste limita de saturație. La ieșirea din cîmpul de înaltă frecvență banda va fi demagnetizată și aptă pentru o nouă înregistrare. Magnetofonul are largi întrebuințări.

Întrebări, exerciții, probleme

1. Indicați factorii de care depinde t.e.m. indusă în primar. Dar în secundar?
2. Ce deosebire este între un transformator ideal și unul real?
3. Ce formă ar fi mai avantajoasă pentru miezul unui transformator, inelară sau dreptunghiulară? De ce?

4. Să se indice cauze care provoacă pierderi în transformator.
5. Puterea unui transformator depinde de secțiunea transversală a miezului? De ce?
6. De ce transformatorul de sonerie nu consumă energie apreciabilă cînd soneria nu sună?
7. De ce se aude un zbîrnîit la un transformator de rețea, în timpul funcționării lui?
8. De ce nu se folosește în electrotehnică bobina lui Ruhmkorff?
9. La primarul unui transformator se aplică o tensiune alternativă de 3 300 V. Înfășurarea lui secundară are 120 de spire, iar la bornele ei, la mers în gol, se află 220 V. Care sînt: raportul de transformare și numărul de spire al primarului?

Răspuns: 15; 1 800 de spire.

10. Înfășurarea primară a unui transformator are 48 de spire, cea secundară 600 de spire. Tensiunea primară are 120 V. Se cer: raportul de transformare și tensiunea secundarului.

Răspuns: $\frac{1}{12,5}$; 1,5 kV.

11. Tensiunea primară a unui transformator este de 36 kV, iar cea secundară de 400 V. Înfășurarea secundară are 30 de spire. Se cer: raportul de transformare și numărul de spire la primar.

Răspuns: 90; 2 700 de spire.

12. Un alternator monofazat cu puterea de 66 kW și tensiunea de 220 V alimentează o rețea de iluminat care are rezistența de 0,5 Ω. Ce putere se pierde pe linie? Dar dacă tensiunea generatorului crește la 2 200 V, puterea lui rămînînd constantă, ce putere se pierde pe linie?

Răspuns: 45 kW; 0,45 kW.

13. Un transformator monofazat are puterea în primar de 50 kW și alimentează o rețea cu tensiunea de 120 V. Randamentul transformatorului fiind 95%, se cer: intensitatea în secundar și pierderea de putere în transformator.

Răspuns: ≈ 396 A; 2,5 kW.

14. Un alternator cu tensiunea la borne de 3 kV alimentează o linie de transport, lungă de 2,5 km, compusă din fire de cupru, cu secțiunea de 261,5 mm². Intensitatea curentului în linie este de 400 A. Se cer:
a) puterea transmisă;
b) puterea disipată pe linie;
c) puterea la sosire;
d) tensiunea la sosire;
e) masa de apă ce s-ar putea încălzi pe oră, de la 10°C pînă la fierbere, cu puterea de la punctul *b*.

Răspuns: 1,2 MW; 52 kW; 1,148 MW; 2,87 kV; 497 kg.

Scanned with OKEN Scanner

8. Electrificare

8.1. Bazele fizice ale electrificării. Prin electrificare se înțelege ansamblul lucrărilor ce se efectuează pentru utilizarea energiei electrice în industrie, agricultură, transporturi și comunicații, în scopuri social-culturale etc. Electrificarea este deci un proces complex, care pune problema *producerii energiei electrice*, *a transportului ei* la locul de consum și a *utilizării* ei. Forma electrică a energiei a pătruns adînc în viața omului și constituie un factor esențial pentru ridicarea productivității muncii, pentru ușurarea muncii, pentru îmbunătățirea condițiilor de trai. Cauza pentru care energia electrică joacă acest rol fundamental decurge din însușirile caracteristice ale acestei forme de energie. Ea se poate obține din toate formele de energie, se poate transforma în orice fel de energie, care poate acționa cele mai diverse feluri de instrumente și mașini. Ea se poate transmite la distanțe mari, cu multă ușurință, rapid și ieftin; poate fi distribuită pe suprafețe mari. Energia electrică stă la baza mecanizării și automatizării proceselor de producție. Mașinile electrice lucrează cu cel mai ridicat randament.

8.2. Producerea energiei electrice. Energia electrică se poate produce cu ajutorul următoarelor aparate: elemente galvanice, acumulatoare și mașini electrice generatoare.

Elementele galvanice se utilizează numai în instalații mici și provizorii, de soneriĭ, telefoane locale, lămpi mici transportabile (lămpi de buzunar), pentru alimentarea unor aparate electronice.

Acumulatoarele se utilizează la autovehicule și unele instalații care lucrează cu ajutorul unor mici generatoare de curent continuu.

Mașinile electrice generatoare, rotative, constituie singurul mijloc actual pentru producerea energiei electrice pe scară industrială.

Scanned with OKEN Scanner

Ele primesc energie mecanică de la un motor primar și o transformă în energie electrică, cu pierderi destul de mici, ceea ce face ca producerea energiei electrice să fie economică, mai ales dacă se ia în considerare randamentul total al folosirii energiei electrice (producere, transport, distribuție și utilizare).

Totalitatea mașinilor și utilajelor care au ca scop să producă energie electrică alcătuiesc o centrală (uzină) electrică.

După energia care acționează generatoarele electrice, centralele se împart în mai multe categorii:

1) *Termocentralele* transformă în energie electrică:

a) energia radiațiilor solare;

b) energia internă a combustibililor clasici (cărbuni, gaze);

c) energia nucleară obținută prin dezintegrarea nucleului anumitor elemente grele (uraniu).

2) *Hidrocentralele* folosesc energia potențială și cinetică a căderilor de apă, a fluxului și refluxului pe malul mărilor.

3) *Centralele eoliene* electrice care transformă energia cinetică a vîntului, adică a maselor de aer ce se deplasează datorită diferențelor de presiune atmosferică, în energie electrică.

8.3. **Centrale termoelectrice cu combustibili clasici.** În aceste uzine complexe materia primă este combustibilul, iar produsul final, energia electrică; afară de aceasta, uneori livrează și căldură sub formă de abur sau apă caldă (centrală cu termoficare).

Combustibilii utilizați sînt, de obicei, de calitate inferioară (lignit, turbă, cărbune brun inferior, gaze reziduale).

Majoritatea covîrșitoare a centralelor termoelectrice sînt centrale cu turbine cu abur.

O centrală termoelectrică cu turbine cu abur se compune din următoarele instalații principale (fig. 8.1):

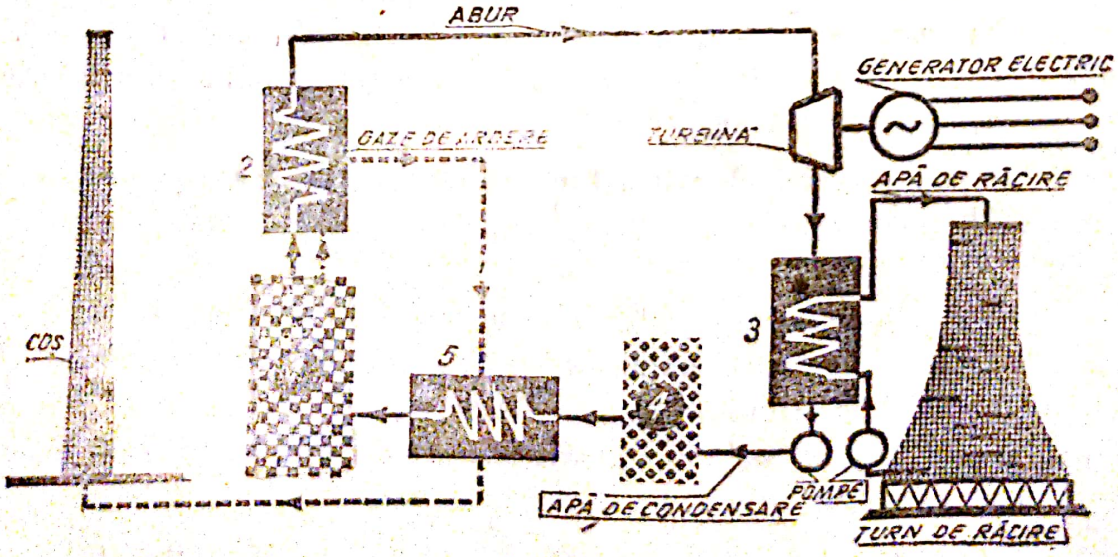


Fig. 8.1

a. *Instalațiile de alimentare cu combustibil.* Cuprind instalațiile și mașinile necesare pentru transportul combustibilului pînă la depozitul de combustibil, descărcarea lui, manipularea în depozit, prepararea preliminară a combustibilului (zdrobirea, ciuruirea, îndepărtarea corpurilor metalice, uscarea) și, în sfîrșit, aducerea combustibilului pe cale mecanică în sala cazanelor.

b. *Sala cazanelor.* Aici sînt instalate agregatele care servesc pentru a transmite corpului activ, adică aburului, căldura produsă prin arderea combustibilului.

Apa este încălzită în cazane (*1*) și transformată în vapori. Aceștia sînt supraîncălziți în supraîncălzitor (*2*) de unde vaporii sînt trimiși în turbine.

Gazele rezultate din arderea în focarul cazanului se răcesc treptat cedînd căldură vaporilor în supraîncălzitor și apoi în economizor (*5*) unde preîncălzesc apa ce vine în cazane.

Circuitul gazelor se termină prin eliminarea lor prin coș.

c. În *sala mașinilor* sînt instalate turbinele cu abur și generatoarele electrice. După ieșirea vaporilor din turbine, circuitul se continuă în instalațiile pentru răcirea aburului și condensarea lui (condensatoarele turbinelor) (*3*). Trecerea vaporilor în stare lichidă se face cu ajutorul apei trimise în condensator cu pompele de răcire. Răcirea apei se face în turnul de răcire. Circuitul apei se încheie prin rezervor (*4*), economizor (*5*) în cazane.

d. *Instalațiile de alimentare cu apă și de preparare a apei* cuprinzînd utilajul și dispozitivele care servesc pentru înlocuirea pierderilor de apă, pentru prepararea termică și chimică a apei de alimentare, precum și pentru alimentarea cu apă a cazanelor cu abur.

e. *Instalația de distribuție a energiei electrice*: camera de comandă și stațiile de conexiuni și de transformare.

În camera de comandă sînt concentrare aparatele necesare controlului funcționării tuturor instalațiilor centralei, a liniilor de transport și a transformatoarelor. Tot aici se găsesc o serie de aparate care permit tehnicianului să varieze regimul de lucru al agregatelor centralei și regimul consumatorilor alimentați de aceștia.

Din cele arătate mai sus, se vede că alcătuirea unei centrale termoelectrice moderne cu turbine de abur este destul de complexă.

Centralele termoelectrice de putere mare au construcție, în principiu, asemănătoare. Ele se plasează, de obicei, în apropierea zăcămintelor naturale de combustibil.

De exemplu, centrala electrică de la Luduș este amplasată într-o regiune bogată în zăcăminte de gaze naturale, iar cea de la Paroșeni, în bazinul carbonifer al Văii Jiului.

8.4. Centrale hidroelectrice. Căderile de apă reprezintă una din cele mai importante surse de energie pentru producerea energiei electrice. Problema folosirii acestei energii este importantă pentru țara noastră, care dispune de numeroase căderi de apă. Hidrocentralele „Gh. Gheorghiu-Dej" de pe Argeș (220 MW) și „V. I. Lenin" de la Bicaz (210 MW) sînt printre cele mai mari hidrocentrale din țara noastră.

Scanned with OKEN Scanner

Energia electrică produsă de centralele hidroelectrice este, de obicei, mai ieftină decît cea produsă de centralele termoelectrice. În afară de aceasta, prin amenajarea căderilor de apă, se execută o serie de lucrări care permit irigarea unor regiuni secetoase, micșorează pericolul inundațiilor, permit navigația pe unele rîuri, precum și asanarea unor terenuri mlăștinoase etc. Principiul de funcționare al unei centrale hidroelectrice este următorul:

Apa unui rîu (*1*) este oprită într-un punct favorabil de un dig sau baraj (*3*) (fig. 8.2). În spatele barajului, apa formează un lac (*2*) (fotografia 2, planșa 1). Din acest lac care asigură un debit constant, apa pornește pe o conductă cu o pantă foarte lină (*4*) (conducta de aducțiune), care merge pînă la castelul de echilibru (*5*) (fotografia 3, planșa 2).

Din castelul de echilibru, apa se deplasează pe niște conducte cu pantă foarte mare (conducte forțate) (*6*) (fotografia 3, planșa 2) spre clădirea centralei (*7*) (fotografia 5, planșa 2). Fiecare conductă forțată vine în dreptul unei turbine hidraulice și apa, sub presiune, acționează turbina. Turbina este cuplată cu un generator de energie electrică. Energia produsă este transmisă prin cabluri la stația de transformare, la camera de comandă a centralei, așa cum s-a arătat și la centrala termoelectrică.

După ce trece prin turbină, apa iese afară prin canalul de fugă și de acolo în rîu.

De exemplu, la hidrocentrala „V.I. Lenin" de la Bicaz pe rîul Bistrița, prin construirea unui baraj de beton de 100 m înălțime la Izvorul-Muntelui s-a realizat un lac de acumulare de peste 1,2 miliarde m³ și lung de 35 km.

Pe planșele de la sfîrșitul manualului se pot observa cîteva dintre elementele comune oricărei hidrocentrale descrise mai sus.

8.5. **Transportul și distribuția energiei electrice.** Energia electrică produsă în centrală trebuie să fie transportată la consumatori. Acest proces se face cu ajutorul

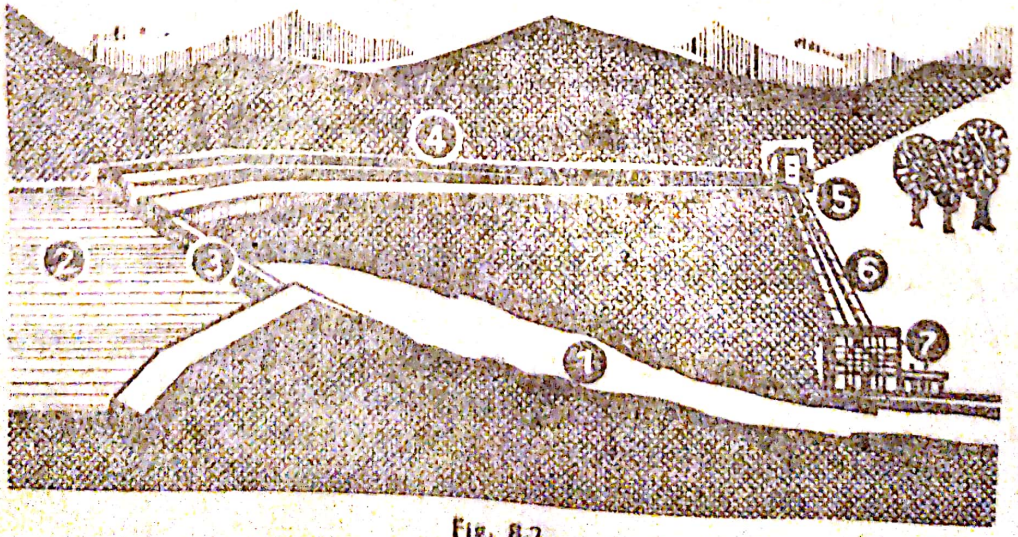


Fig. 8.2

Energia electrică produsă de centralele hidroelectrice este, de obicei, mai ieftină decît cea produsă de centralele termoelectrice. În afară de aceasta, prin amenajarea căderilor de apă, se execută o serie de lucrări care permit irigarea unor regiuni secetoase, micșorează pericolul inundațiilor, permit navigația pe unele rîuri, precum și asanarea unor terenuri mlăștinoase etc. Principiul de funcționare al unei centrale hidroelectrice este următorul:

Apa unui rîu (*1*) este oprită într-un punct favorabil de un dig sau baraj (*3*) (fig. 8.2). În spatele barajului, apa formează un lac (*2*) (fotografia 2, planșa 1). Din acest lac care asigură un debit constant, apa pornește pe o conductă cu o pantă foarte lină (*4*) (conducta de aducțiune), care merge pînă la castelul de echilibru (*5*) (fotografia 3, planșa 2).

Din castelul de echilibru, apa se deplasează pe niște conducte cu pantă foarte mare (conducte forțate) (*6*) (fotografia 3, planșa 2) spre clădirea centralei (*7*) (fotografia 5, planșa 2). Fiecare conductă forțată vine în dreptul unei turbine hidraulice și apa, sub presiune, acționează turbina. Turbina este cuplată cu un generator de energie electrică. Energia produsă este transmisă prin cabluri la stația de transformare, la camera de comandă a centralei, așa cum s-a arătat și la centrala termoelectrică.

După ce trece prin turbină, apa iese afară prin canalul de fugă și de acolo în rîu.

De exemplu, la hidrocentrala „V.I. Lenin" de la Bicaz pe rîul Bistrița, prin construirea unui baraj de beton de 100 m înălțime la Izvorul-Muntelui s-a realizat un lac de acumulare de peste 1,2 miliarde m³ și lung de 35 km.

Pe planșele de la sfîrșitul manualului se pot observa cîteva dintre elementele comune oricărei hidrocentrale descrise mai sus.

8.5. **Transportul și distribuția energiei electrice.** Energia electrică produsă în centrală trebuie să fie transportată la consumatori. Acest proces se face cu ajutorul

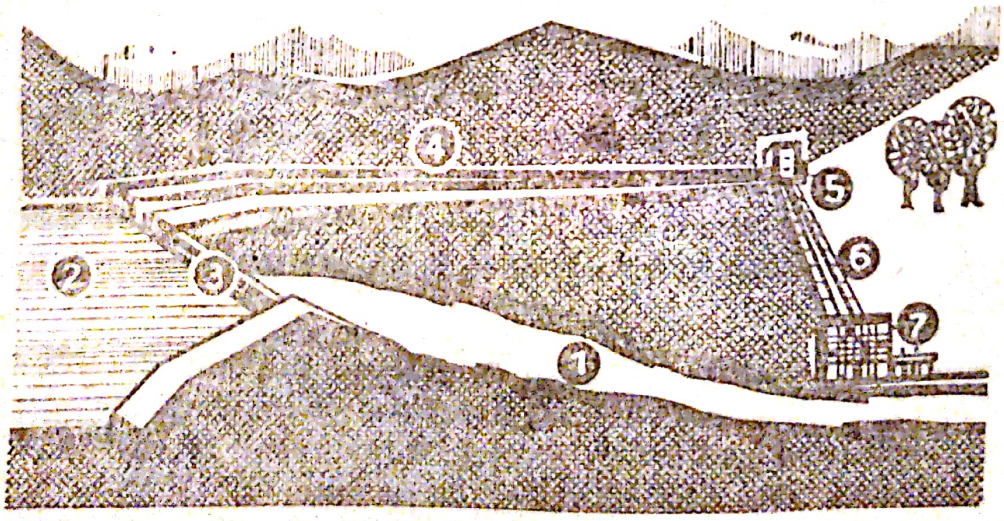


Fig. 8.2

liniilor de transport. Energia ajunge la consumator prin intermediul liniilor de distribuție.

Tensiunea de alimentare a consumatorilor este o tensiune joasă (sub 400 V). De exemplu, o lampă electrică (bec) funcționează la 120 V sau 220 V; un motor electric, la 380 V între faze, ceea ce revine la 220 V față de pămînt.

În cazul cînd raza de acțiune a centralei electrice este mai mică de 2,5 km și sarcinile nu sînt mari (este vorba de centralele mici), atunci producerea și transportul energiei electrice se fac la tensiune joasă, adică la tensiunea de utilizare.

În cazul cînd distanța este mai mare și puterea electrică transportată este de asemenea mare (aici este cazul marilor centrale electrice), atunci transportul energiei electrice nu mai poate fi făcut la tensiune joasă, deoarece transportul nu ar mai fi economic.

În centralele electrice mari, generatoarele produc energie electrică la o tensiune de 6—20 kV.

Transportul acestei energii se face la o tensiune înaltă de la 35—500 kV. De obicei se utilizează linii de 110 kV, 220 kV și 400 kV.

În principiu, tensiunea înaltă a generatorului este transformată cu ajutorul transformatoarelor ridicătoare de tensiune la o tensiune foarte înaltă (fotografia 4, planșa 2). Tensiunea este apoi coborîtă treptat prin intermediul stațiilor de transformare intermediare pînă la aceea necesară consumatorilor, în rețelele de distribuție.

8.6. Electrificarea țării noastre. Pe baza directivelor date de partid, s-a întocmit — în 1950 — primul plan de electrificare pe o perioadă de 10 ani, care prevedea crearea a numeroase centrale electrice, dezvoltarea rețelelor de linii de înaltă tensiune și dezvoltarea industriei electrotehnice. Sarcinile primului plan de electrificare pe primii 10 ani au fost realizate înainte de termen și producția de energie electrică a crescut la aproximativ 7,7 miliarde kWh în 1960, depășind de șapte ori producția anului 1938. Creșterea producției de energie electrică a avut o importanță deosebită pentru industrializarea socialistă a țării, pentru introducerea tehnicii avansate și trecerea la mecanizarea și automatizarea unor procese de producție.

În această perioadă s-au construit între altele centralele de la Doicești (120 MW), Sîngiorgiu-de-Pădure (150 MW).

A urmat un plan de șase ani în care s-a terminat construcția mai multor centrale și s-au extins altele: astfel, în această perioadă s-au încheiat construcțiile de la termocentralele de la Paroșeni (300 MW), Brazi (200 MW), Borzești (225 MW). Ultima este și prima mare centrală de termoficare din țară (fotografia 6, planșa 3).

Tot în această perioadă s-a construit hidrocentrala de la Stejarul („V.I. Lenin" — Bicaz) care are o putere de 210 MW. Această hidrocentrală face parte din sistemul hidroenergetic amenajat pe Bistrița, care a fost terminat în 1966. În totalitate puterea instalată a celor 10 hidrocentrale din acest sistem este de 450 MW.

În cursul anului 1966 a intrat în funcțiune și hidrocentrala de pe rîul Argeș, cu o putere instalată de 220 MW, iar la începutul anului 1967 s-a realizat puterea maximă la termocentrala Ludus (800 MW).

Scanned with OKEN Scanner

În cursul anului 1972 s-a atins puterea maximă la hidrocentrala de la Porțile de Fier construită în colaborare cu R.S.F. Iugoslavia (2 100 MW).

În anul 1974 a fost conectată (cu întreaga capacitate) la sistemul energetic național cea mai mare hidrocentrală de pe rîurile interioare ale țării, hidrocentrala de pe Lotru (510 MW).

Un loc important în electrificarea țării îl ocupă utilizarea energiei electrice în industrie, agricultură, zootehnie, în scopuri social-culturale (iluminat, cinematograf, radio, televiziune, aparate electromecanice etc.).

Pentru transportul și distribuția energiei electromagnetice s-au construit numeroase linii electrice de înaltă tensiune (110 kV). A fost creat sistemul energetic național*, ceea ce permite o mai bună folosire a capacității diferitelor centrale electrice.

* Într-un sistem energetic național sursele de energie de pe teritoriul țării sînt interconectate.

9. Procese electronice în gaze și vid

A. Curentul electric în gaze

9.1. **Ionizarea gazelor.** Gazele uscate, la presiunea atmosferică sau la o presiune mai mare, sînt izolatoare, deoarece sînt constituite din atomi sau molecule neutre și deci nu conțin purtători de sarcină electrică, care să se deplaseze sub acțiunea unui cîmp electric.

Se numesc *purtători de sarcini* particulele încărcate cu electricitate ca: electronii, ionii, moleculele sau particulele de dimensiuni mai mari care poartă sarcini electrice.

Pentru ca un gaz să devină bun conducător de electricitate este necesar să creăm în el purtători de sarcini electrice libere. Aceasta se realizează sub acțiunea unor *agenți ionizanți* cum sînt: flăcările care aduc gazele la temperaturi înalte, radiațiile Röntgen, radiațiile ultraviolete, radiațiile emise de substanțele radioactive etc.

Experiență. Se montează un circuit format dintr-un generator de curent continuu (de 200—300 V), un condensator plan cu aer (cu armăturile A și C la circa 2 cm una de alta), un galvanometru G și un rezistor R (fig. 9.1). Constatăm că acul galvanometrului nu deviază, deci prin circuit nu trece curentul electric, aerul dintre armăturile condensatorului este izolator.

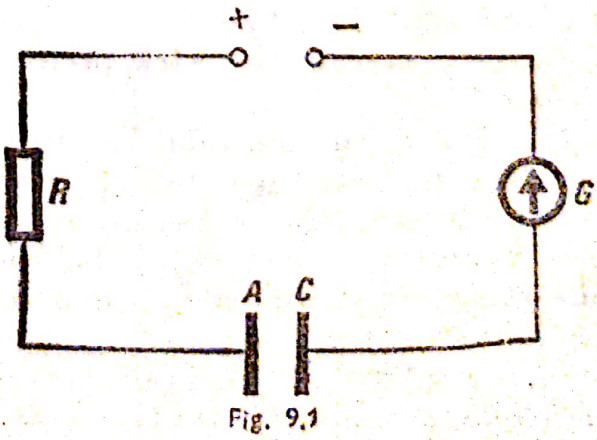


Fig. 9.1

Rezistorul R trebuie să aibă o rezistență suficient de mare (minimum 1 M Ω)

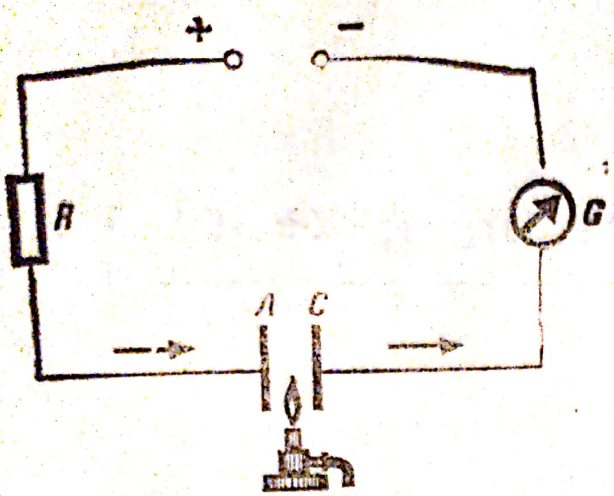


Fig. 9.2

pentru a proteja galvanometrul în caz de atingere accidentală a plăcilor.

Cu un bec de gaz încălzim aerul dintre armături (fig. 9.2); galvanometrul indică trecerea unui curent prin circuit (de ordinul a 10^{-6}A). Aceasta dovedește că prin încălzire aerul dintre armăturile condensatorului a devenit bun conducător de electricitate.

Același fenomen se produce dacă înlocuim aerul dintre armături cu alt gaz, sau dacă schimbăm agentul ionizant.

O experiență ușor de realizat, care dovedește că prin ridicarea temperaturii se mărește conductibilitatea aerului, este descărcarea unui electroscop încărcat, prin apropierea de el a unei flăcări.

Care sînt fenomenele care au loc la trecerea curentului electric printr-un gaz în cazul experiențelor descrise mai sus?

Într-un gaz, sub acțiunea unui agent ionizant extern crește numărul atomilor și moleculelor cu viteze mari, deci cu energii cinetice suficient de mari pentru a extrage cîte un electron din atomii pe care-i ciocnesc. Electronii extrași devin *electroni liberi*, sau se pot uni cu atomi sau molecule neutre de gaz, formînd *ioni negativi*. Atomii din care s-au extras electroni devin *ioni pozitivi*.

Astfel, în gaze, iau naștere purtători de sarcini electrice libere, sub formă de electroni liberi și ioni pozitivi și negativi.

● Procesul de formare a ionilor în gaze se numește ionizarea gazelor.

Pentru ionizare, este necesară o cantitate de energie, pe care atomul o primește de la agentul ionizant. Energia minimă necesară ionizării unui atom se numește *energie de ionizare*.

Ionii și electronii liberi, care se formează într-un gaz, într-un cîmp electric sînt dirijați astfel: ionii negativi și electronii liberi spre anod, iar ionii pozitivi spre catod.

Deci, *curentul electric prin gaze este produs prin deplasarea electronilor liberi și a ionilor pozitivi și negativi*.

Trecerea curentului electric printr-un gaz ionizat se numește *descărcare electrică în gaz*.

Ca și în cazul curentului electric în electroliți, trecerea curentului electric în gaze se datorește conductibilității ionice dar nu are loc și o depunere la electrozi. Ionii dintr-un gaz ajungînd la electrozi se neutralizează, devenind atomi sau molecule care difuzează înapoi în gaz. În electroliți, ionii atingînd electrozii se neutralizează, iar atomii sau moleculele rezultate se depun pe electrozi, sau intră în reacții chimice.

În timpul ionizării unui gaz are loc și o micșorare a numărului de ioni în unitatea de volum, prin *recombinarea* lor, adică printr-un fenomen de neutralizare reciprocă. Deci, sub acțiunea unor agenți ionizanți externi și în absența unui cîmp electric, se

ajunge la un moment dat la o stare de echilibru: numărul de ioni ce se formează în unitatea de timp este egal cu numărul de ioni ce se recombină. În lipsa agentului ionizant, are loc numai recombinarea ionilor și conductibilitatea electrică a gazului încetează. Prin recombinare se eliberează energie sub formă de radiații luminoase.

9.2. **Curentul de saturație.** Se cercetează cu ajutorul unei experiențe variația intensității curentului prin gaze, în funcție de tensiunea dintre electrozi.

Între două plăci metalice paralele P_1 și P_2, legate la polii unei baterii, se află aer la presiunea atmosferică care este sub acțiunea unui agent ionizant extern. Se introduc în circuit un galvanometru G, un voltmetru V și un potențiometru P (fig. 9.3).

Aplicăm între plăcile P_1 și P_2 o tensiune mică, pe care o mărim treptat și observăm la început că intensitatea curentului ce trece prin gazul ionizat crește proporțional cu tensiunea aplicată: între intensitatea I și tensiunea U se aplică legea lui Ohm. În figura 9.4 este porțiunea OA de pe curbă.

Continuăm să mărim tensiunea, intensitatea curentului începe să crească tot mai încet și pentru valori mari ale tensiunii, curentul rămîne constant. Curentul maxim care nu mai depinde de tensiunea aplicată se numește *curent de saturație*. Porțiunea AB a curbei caracteristice corespunde curentului de saturație, iar mărimea lui este notată cu I_S.

Formarea curentului de saturație se explică astfel:

Cînd tensiunea dintre electrozi este mică, ionii din gaz se deplasează încet și au timp să se recombine. Deci nu toți ionii formați sub acțiunea agentului ionizant ajung la electrozi.

Cu cît tensiunea dintre electrozi este mai mare, cu atît ionii și electronii se deplasează mai repede. La tensiuni destul de mari corespunzătoare punctului A de pe caracteristică toți ionii formați sub acțiunea agentului ionizant se vor duce la electrozi nemaiavînd timpul necesar să se recombine; se obține astfel curentul de saturație.

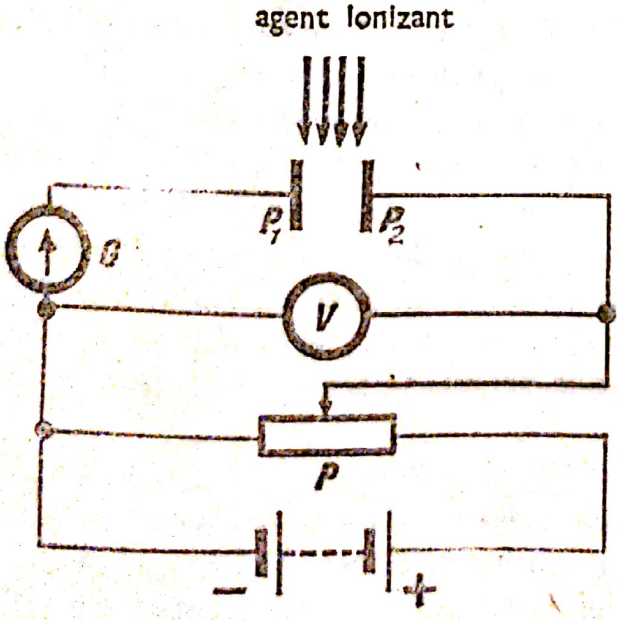


Fig. 9.3

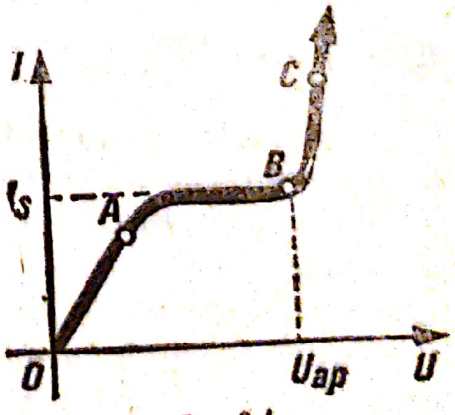


Fig. 9.4

Descărcarea în gaze reprezentată de porțiunea *OAB* a curbei caracteristice, care are loc numai sub acțiunea agentului ionizant extern, se numește *descărcare neautonomă* (sau *dependentă*).

9.3. **Avalanșe electronice.** Dacă în experiența descrisă în paragraful precedent, se aplică în continuare la electrozi tensiuni din ce în ce mai mari, intensitatea curentului începe să crească, mai întîi încet, apoi din ce în ce mai repede, iar descărcarea este reprezentată de porțiunea *BC* a curbei caracteristice.

În acest caz, descărcarea are loc chiar dacă acțiunea agentului ionizant extern încetează și se numește *descărcare autonomă* (sau *independentă*).

Tensiunea aplicată electrozilor de la care începe descărcarea autonomă se numește *tensiune de aprindere*, deoarece descărcarea este însoțită de lumină; pe figura 9.4 este notată cu U_{ap}.

Descărcarea autonomă se explică astfel: cînd tensiunea aplicată electrozilor depășește tensiunea de aprindere U_{ap}, energia cinetică a ionilor pozitivi este suficient de mare ca la ciocnirea de catod să pună în libertate electronii din acesta. Acești electroni, și — mai rar — electronii eliberați de moleculele neutre datorită ciocnirii cu ionii accelerați de cîmpul electric *(electronii secundari)* au energii cinetice foarte mari și ciocnindu-se cu alte molecule le ionizează punînd în libertate alți electroni.

Fenomenul se numește ionizare prin ciocnire și face ca în spațiul dintre electrozi numărul electronilor să se înmulțească mereu. În modul acesta se provoacă o *avalanșă electronică*, care mărește foarte mult intensitatea curentului.

9.4. **Descărcarea în gaze la presiunea normală.** Se cercetează întîi descărcarea în gaze la presiunea normală și să luăm ca exemplu descărcarea în aer.

În atmosferă, datorită radiațiilor cosmice, a radiațiilor emise de substanțele radioactive naturale (ce vor fi studiate în anul IV) și a altor factori, care produc o ionizare naturală numită *ionizare remanentă*, un conductor electrizat nu-și păstrează la nesfîrșit încărcarea; oricît ar fi de bine izolat el se descarcă. Pentru a demonstra existența ionizării remanente, se încarcă un electroscop, bine izolat și după un interval de timp mai îndelungat, se observă o scădere a deviației foițelor lui.

În aer la presiunea normală, are loc o descărcare electrică produsă în jurul conductoarelor aflate la înaltă tensiune, datorită ionizării produsă de purtătorii de sarcină aflați în cîmpul electric intens din jurul lor. Acest fenomen se numește *descărcare în coroană* (sau *efect corona*) și este însoțit de o lumină violetă slabă, vizibilă în întuneric.

Cînd astfel de descărcări au loc la extremitatea catargelor metalice ale vapoarelor, a paratrăsnetelor etc., mai ales în timpul furtunilor, se numesc *focuri Sf. Elm.*

Dintre descărcările electrice autonome la presiune normală vom studia: *scînteia electrică* și *arcul electric.*

9.5. **Scînteia electrică.** Între doi electrozi vecini, aflați în aer, într-un cîmp electric intens (de la 200 la 300 kV/m), datorită fenomenului de ionizare prin ciocnire, trece un curent electric de intensitate mare, care este însoțit de fenomene luminoase. Porțiunea luminoasă a acestei descărcări electrice autonome se numește *scînteie electrică* (vezi planșa 4, tubul *a*).

Scanned with OKEN Scanner

Scînteia electrică este o descărcare de durată foarte scurtă (10^{-7}—10^{-3}s), însoțită în afară de efecte luminoase, de efecte termice, mecanice (perforează un material electro-izolator), chimice (formează ozonul din oxigenul atmosferic).

În atmosferă, datorită ionizării remanente, în prezența unui cîmp electric de intensitate mare se produc scîntei electrice foarte mari: *fulgere* și *trăsnete* în care se poate ajunge la curenți de intensități de sute de mii de amperi.

9.6. **Arcul electric.** Pe două suporturi izolatoare fixăm doi cărbuni de retortă, pe care îi montăm în serie cu o sursă de curent care, la o tensiune de circa 40 V, dă intensitate de minimum 2 A.

Se apropie cei doi cărbuni pînă la contact; observăm că vîrfurile lor devin incandescente. Se depărtează apoi cu cîțiva milimetri cărbunii unul de altul și între ei ia naștere o flacără în formă de *arc electric* (fig. 9.5).

Arcul electric a fost descoperit de *H. Davy* (1778—1829) în 1813. Funcționarea arcului electric se explică astfel: la contactul inițial al cărbunilor ei se încălzesc puternic datorită efectului Joule. Îndepărtînd apoi cărbunii, catodul incandescent emite un flux de electroni, care ionizează aerul prin ciocnire și sub acțiunea cîmpului electric bombardează anodul pulverizîndu-l și formînd un *crater*. Catodul ia forma de vîrf (fig. 9.6).

În curent continuu anodul se consumă mai repede, fiind supus bombardării fluxului de electroni. De aceea el se face mai gros; în curent alternativ ambii electrozi se consumă la fel.

Reglarea distanței dintre cărbunii care se consumă în timpul funcționării se poate face automat cu dispozitive speciale.

Temperatura înaltă de peste 4 500°C a arcului electric îl face folosibil la cuptoare electrice ca, de exemplu, în metalurgie la prepararea aluminiului, la sudarea metalelor etc.; poate servi pentru producerea unor reacții chimice, ca de exemplu la transformarea metanului în acetilenă.

În industria chimică, la uzinele de la Rîșnov și Borzești, se produc anual pe calea descărcărilor în arc zeci de mii de tone de acetilenă.

9.7. **Lampa cu vapori de mercur.** Descărcarea în arc între electrozi cu mercur, într-un mediu cu vapori de mercur prezintă importanță pentru obținerea radiațiilor ultraviolete. O astfel de descărcare are loc într-un tub de cuarț, în care s-a făcut vid,

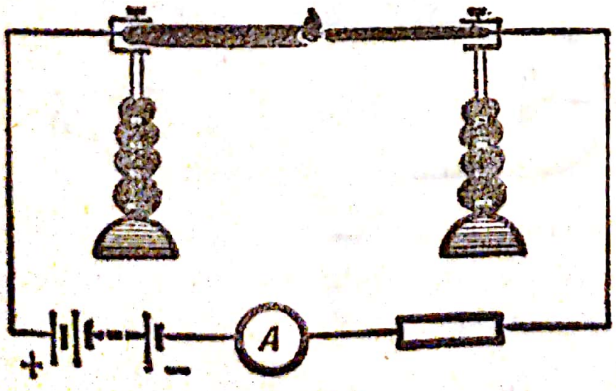


Fig. 9.5

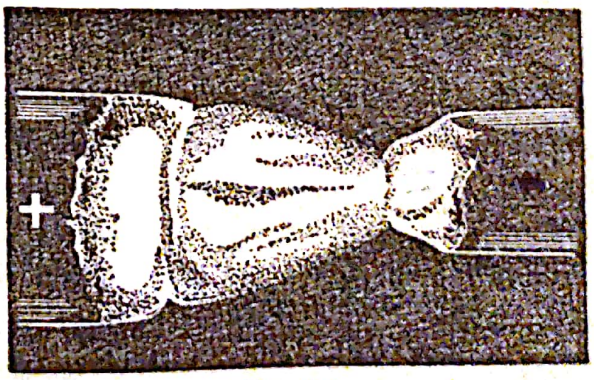


Fig. 9.6

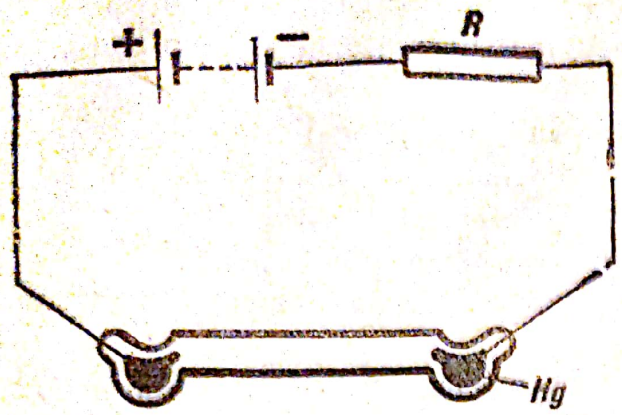


Fig. 9.7

avînd electrozii de mercur și care se numește *lampă cu vapori de mercur* (fig. 9.7).

Tubul este din cuarț, deoarece, spre deosebire de sticla obișnuită, cuarțul poate fi străbătut de radiațiile ultraviolete. Aprinderea lămpii se face printr-o basculare a tubului, cînd mercurul de la capete se unește într-o singură coloană și apoi se separă din nou, iar în vaporii de mercur obținuți prin vaporizarea lui se formează un arc electric.

Deoarece arcul electric în vapori de mercur emite radiații ultraviolete, lămpile cu vapori de mercur se folosesc în medicină în tratamentul unor boli de piele, la sterilizarea apei, sau în laboratoare, ca sursă de radiații ultraviolete.

Dacă arcul electric cu vapori de mercur are loc între un electrod de fier și unul de mercur, curentul nu trece decît de la fier (anod) la mercur (catod), de unde rezultă utilizarea unui astfel de arc la redresarea curentului electric.

9.8. Descărcarea în gaze rarefiate. Descărcarea în gaze la presiuni scăzute dă naștere la o serie de fenomene complexe. La explicarea acestor fenomene au contribuit cu lucrări importante și fizicienii români *Eugen Bădărău* (n. 1887) și *Th. V. Ionescu* (n. 1899).

Se studiază *aspectul descărcării pentru diferite presiuni ale gazului*, folosindu-ne de un tub de sticlă de circa 40 cm lungime și de 4 cm diametru, care are în interior doi electrozi metalici și este prevăzut cu un tub lateral ce comunică cu o pompă de vid (fig. 9.8).

Se aplică la electrozi o tensiune de ordinul miilor de volți de la o bobină de inducție, sau de la o mașină electrostatică.

Inițial, în tub, se găsește un gaz, spre exemplu aer la presiune normală; cu o pompă de vid se micșorează treptat presiunea.

Se disting următoarele faze principale (planșa 4):

a) pînă la presiunea de circa 40 k$\frac{N}{m^2}$ descărcarea are aspectul unei scîntei electrice ramificate în aer (situația *a*);

b) micșorînd presiunea la 13,3 k$\frac{N}{m^2}$ în tub se observă o bandă de formă sinuoasă, de culoare roză (situația *b*);

c) dacă se micșorează și mai mult presiunea în tub, la presiunea de aproximativ 1,33 k$\frac{N}{m^2}$, banda luminoasă care pleacă de la anod și se întinde pînă aproape de catod umple întreg tubul; se numește *coloană pozitivă* (situația *c*);

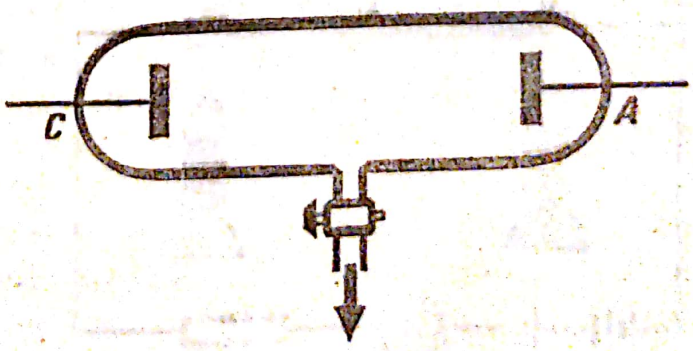


Fig. 9.8

d) cînd presiunea este de circa 133 $\frac{N}{m^2}$, se observă în lungul tubului de descărcare (de la catod spre anod), următoarele regiuni luminoase și întunecoase (situația *d*): *spațiul întunecat al lui Aston (1)*, urmat de o lumină violetă numită *lumină catodică (2)*. În imediata vecinătate este un spațiu întunecat numit *spațiul întunecat al lui Hittorf* (sau *Crookes) (3)*, apoi *lumina negativă (4)* și *spațiul întunecat al lui Faraday (5)* urmat de *coloana pozitivă stratificată (6)*, de *spațiul întunecat anodic (7)* și *de lumina anodică (8)*.

Descărcarea electrică autonomă descrisă mai sus, caracterizată prin prezența unor fenomene luminoase specifice, se numește *descărcare luminescentă*.

Pentru o presiune sub 1,3 $\frac{N}{m^2}$, coloana pozitivă și spațiul întunecat al lui Faraday dispar, în timp ce spațiul întunecat al lui Hittorf ocupă tot tubul. Descărcarea continuă și în același timp, pe peretele de sticlă pe partea opusă catodului se observă o fluorescență galben-verzuie, care se datorește (cum vom arăta în paragraful următor) unui fascicul de electroni ce formează radiațiile catodice.

Fenomene analoage se obțin și în tuburi cu alte gaze. Diferă numai culoarea coloanei pozitive, ce depinde de felul gazului din tub, spre exemplu roșie pentru neon, galbenă pentru heliu etc.

Descărcarea electrică în gaze rarefiate se explică prin fenomenul de ionizare prin ciocnire. Într-un gaz puțin rarefiat ionii care se mișcă sub acțiunea cîmpului electric (unde tensiunea este mai mică decît tensiunea de aprindere) sînt reținuți de numărul mare de molecule cu care se întîlnesc și din această cauză nu au energia cinetică suficientă să producă prin ciocnire noi ioni.

Rarefiind gazul, ionii au la dispoziție un *drum liber mediu* (vezi Fizica pentru anul II, secția reală) mai mare; un număr tot mai mare de ioni au posibilitatea să creeze prin ciocnire cu moleculele, noi ioni, ionizînd gazul.

Continuînd rarefierea, ionii nu mai întîlnesc în drumul lor un număr suficient de molecule și posibilitatea de ciocnire este foarte mică.

B. Fascicule de electroni

9.9. Producerea fasciculelor de electroni. S-a arătat la descărcarea în gaze rarefiate, că dacă presiunea gazului în tub scade sub 1,3 $\frac{N}{m^2}$, fenomenele luminoase din interiorul tubului dispar și, pe peretele de sticlă, pe partea opusă catodului, se observă o fluorescență galben-verzuie, datorită unui fascicul de electroni care a primit numele de *radiații catodice*. Ele au fost descoperite de fizicianul german *J.W.Hittorf* (1824—1914) în 1896, iar cea mai mare parte a proprietăților lor au fost descoperite de fizicianul englez *W. Crookes* (1832—1919).

Scanned with OKEN Scanner

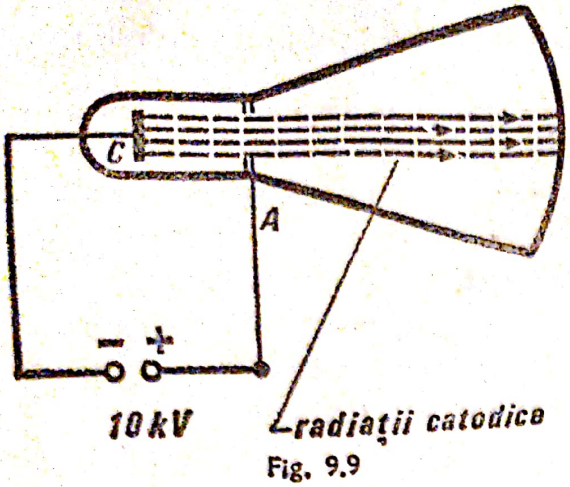


Fig. 9.9

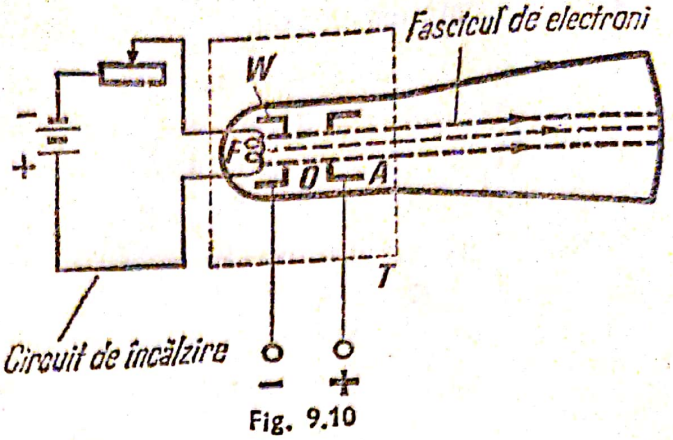


Fig. 9.10

Primele fascicule de electroni au fost obținute cu un tub *Crookes* (fig. 9.9). El se compune dintr-un tub de sticlă, care conține un gaz la o presiune cuprinsă între 1,3 și $0{,}13\frac{N^2}{m}$, un catod C și un anod A.

Stabilind între catod și anod o tensiune de mai multe mii de volți, *catodul emite un fascicul de electroni, perpendicular pe suprafața lui.*

Producerea fasciculelor de electroni (a radiațiilor catodice) se explică astfel: În gazul dintr-un tub Crookes sînt totdeauna cîțiva ioni pozitivi, cărora, datorită cîmpului electric existent, li se imprimă o mișcare accelerată și ei sînt dirijați la catod. Datorită vidului înaintat, ionii nu sînt opriți de moleculele de gaz, iar cîmpul electric intens face ca viteza lor să fie suficient de mare și la ciocnirea de catod provoacă o emisie de electroni. Acești electroni emiși sînt dirijați spre anod. În drumul lor întîlnesc moleculele sau atomii gazului din tub și extrag acestora electroni. Se formează noi ioni pozitivi, care joacă același rol ca și primii.

Astăzi, producerea fasciculelor foarte subțiri (focalizate) de electroni în numeroase aparate (osciloscop electronic, microscop electronic etc.), se bazează pe *emisia termo-electronică* (ce va fi studiată la § 10.1), *care este o emisie de electroni de către substanțe aduse la o temperatură înaltă.*

Pentru a produce fascicule de electroni pe baza emisiei termoelectronice, ne folosim de un *tun electronic* (delimitat pe figura 9.10 cu o linie întreruptă) notat cu *T*, care se compune din:

— un *filament F* care poate fi adus la incandescență de un *circuit de încălzire**;

— un *electrod cilindric W*, perforat și adus la un potențial negativ. Acest electrod focalizează electronii prin orificiul *O* al anodului. La ieșirea din anod fasciculul de electroni este foarte subțire.

— un *anod cilindric A* prevăzut cu o mică deschidere *O*.

* Adesea se folosește o *încălzire indirectă* a filamentului așa cum vom arăta la tuburile electronice.

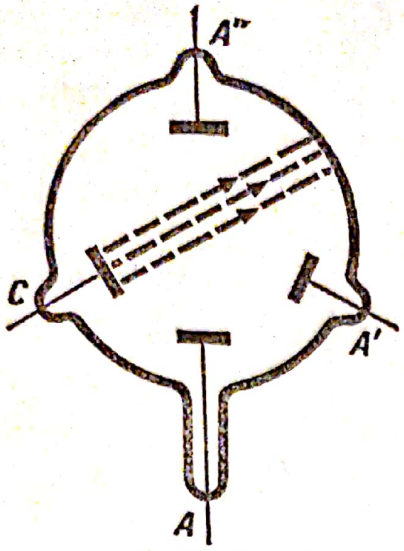


Fig. 9.11

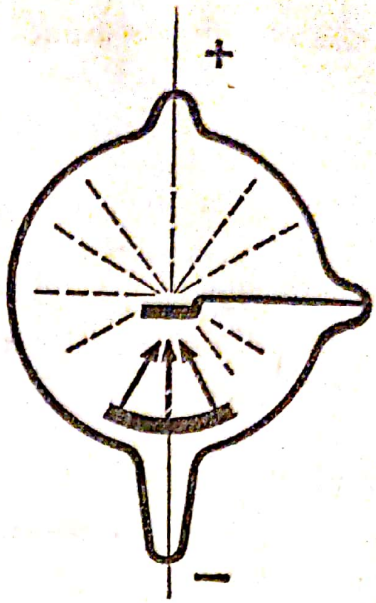


Fig. 9.12

9.10 Proprietățile fasciculelor de electroni.

a) *Fasciculele de electroni produc fluorescența unor substanțe.* Dacă introducem în interiorul unui tub Crookes diferite substanțe, constatăm că ele devin fluorescente cînd sînt bombardate de fasciculul de electroni. În acest caz substanțele absorb energia electronilor și o eliberează sub formă de radiații luminoase de diferite culori.

b) *Fasciculele de electroni se propagă în linie dreaptă perpendicular pe suprafața catodului.* Pentru a pune în evidență această proprietate, ne folosim de un tub Crookes cu mai mulți anozi. Observăm că sticla devine fluorescentă numai în partea opusă catodului pe o direcție perpendiculară pe suprafața acestuia, chiar dacă punem sub tensiune pe rînd anozii din A, A' sau A'' (fig. 9.11). Deci poziția anodului nu influențează direcția fasciculului de electroni cînd aceștia au viteze foarte mari.

c) *Fasciculele de electroni au energie cinetică.*

Experiența 1. Într-un tub Crookes, care are catodul în forma unei calote sferice, fasciculul de electroni concentrat asupra unei foițe de platină plasată în centrul sferei din care face parte calota, înroșește foița (fig. 9.12). Deci fasciculul de electroni are energie cinetică, care se transformă în energie termică.

Experiența 2. Dacă se așază în drumul unui fascicul de electroni o morișcă cu aripioarele de aluminiu sau mică, constatăm că ea se rotește în sensul în care se deplasează fasciculul (fig. 9.13). Această experiență dovedește transferul energiei cinetice a fasciculului de electroni către morișcă.

d) *Fasciculele de electroni sînt absorbite de substanțele pe care le întîlnesc.* Parcursul unui fascicul de electroni în aer este de cîțiva milimetri. Dacă substanța așezată în drumul fasciculului de electroni este subțire, fasciculul o străbate. Astfel *Philipp Lenard* (1862—1947) în anul 1894, folosind un tub Crookes ce avea în fața catodului o fereastră mică aco-

Fig. 9.13

perită cu o foiță de aluminiu (de 0,002 mm grosime), a constatat că fasciculul de electroni străbate foița de aluminiu dar acesta era mai puțin intens în spatele ei.

e) Dacă un fascicul de electroni întîlnește în drumul lui un obstacol, spre exemplu o placă de platină sau tungsten, produce *radiații Röntgen*, de natură deosebită de a radiațiilor catodice (vor fi studiate în anul IV).

9.11. Viteza electronilor în tuburile Crookes. La ieșirea din catod electronii au o viteză neglijabilă. Putem considera $v_0 = 0$. Cunoaștem de la electricitate, că dacă o sarcină electrică q se deplasează de la un punct A unde potențialul este V_A, la un punct B ce are potențialul V_B, lucrul mecanic efectuat de cîmpul electric este:

$$W = q(V_A - V_B).$$

În cazul electronului

$$q = -e,\ V_B > V_A;\ V_B - V_A = U$$

de unde:

$$W = eU,$$

în care e este sarcina electronului, iar U diferența de potențial dintre anod și catod.

Acest lucru mecanic W este egal cu variația energiei cinetice a electronului (conform principiului conservării energiei) și, deoarece energia cinetică inițială a electronului este zero, rezultă:

$W = \frac{1}{2} m_0 v^2$, unde m_0 este masa de repaus a electronului, iar v viteza lui.

Deci putem scrie:

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = eU \qquad (1)$$

sau

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}}. \qquad (2)$$

Folosind formula $W = eU$, pentru o tensiune $U = 10\,000$ volți energia cinetică a electronului este:

$$W = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 10^4 \text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-15}\ \text{J}.$$

Se vede că joulul este o unitate prea mare pentru măsurarea energiei cinetice a particulelor, din care cauză se folosește *electronvoltul* (simbol: eV).

- Un **electronvolt** este energia cinetică dobîndită de un electron, cînd este accelerat de o diferență de potențial de 1 V.

După formula $W = eU$ această energie este:

$$W = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{C} \cdot 1\ \text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J.$$

$$\boxed{1\ \text{electronvolt} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{jouli}}$$

9.12. Acțiunea cîmpului electric uniform asupra unui fascicul de electroni. *Experiență.* Se folosește un tub Crookes, în care anodul se găsește aproape de catod și este prevăzut cu o diafragmă ce lasă să treacă un fascicul îngust de electroni printre

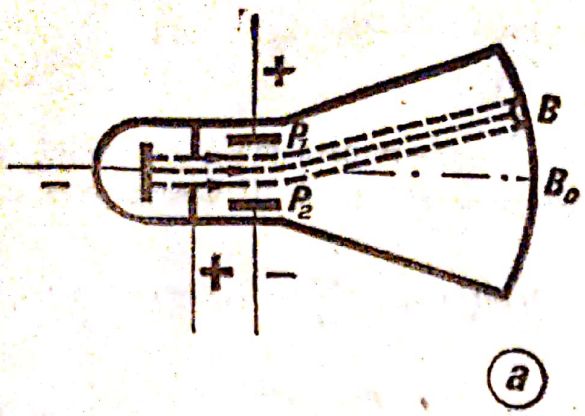
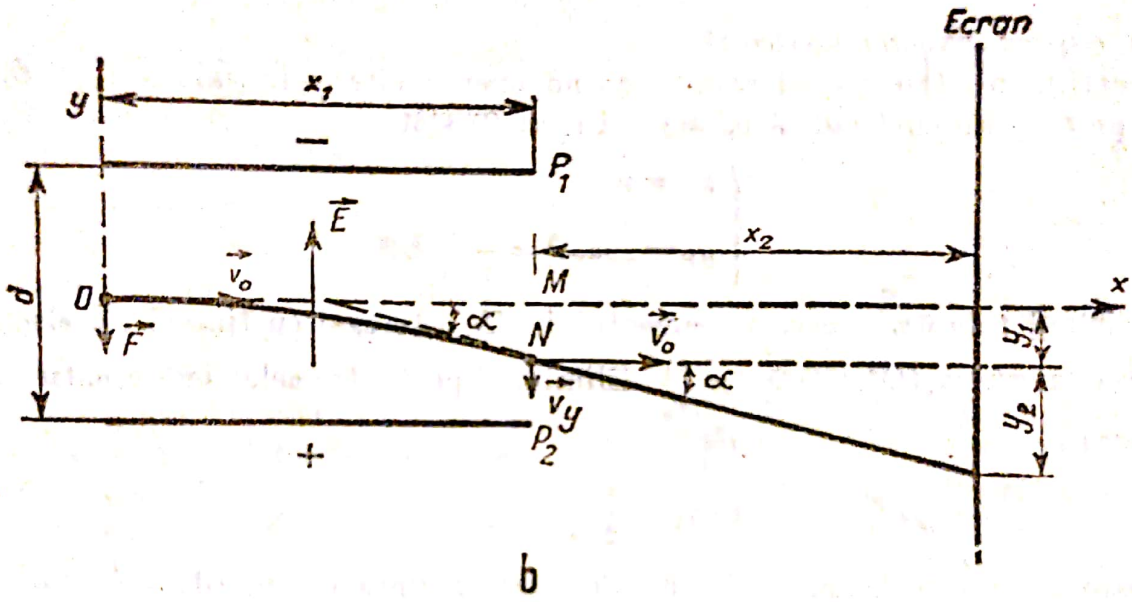


Fig. 9.14

a



b

plăcile unui condensator P_1P_2 (fig. 9.14, *a*). Partea interioară a peretelui anterior, ecranul, este acoperită cu o substanță fluorescentă. Dacă condensatorul nu este încărcat observăm pe ecranul tubului o pată fluorescentă B_0.

Legînd armătura P_1 la borna pozitivă a unui generator de curent și armătura P_2 la borna negativă, observăm că pata fluorescentă se deplasează în B, spre armătura încărcată pozitiv, ceea ce demonstrează că:

● **Un fascicul de electroni este deviat de un cîmp electric**

Fasciculul fiind atras de armătura pozitivă și respins de armătura negativă, se confirmă că particulele fasciculului sînt sarcini electrice negative (electroni).

Calculul deviației electronului în cîmp electric uniform. Să considerăm un electron, care pătrunde într-un cîmp electric uniform $\vec{E}$, perpendicular pe liniile de forță, cu viteza $\vec{v_0}$. Electronul, de sarcină electrică $-e$, este supus unei forțe electrice $\vec{F} = -e\vec{E}$, dirijată în sens contrar cîmpului electric $\vec{E}$.

Raportăm mișcarea electronului la două axe rectangulare (fig. 9.14, *b*): axa Ox orientată în sensul vitezei $\vec{v_0}$ și Oy orientată în același sens cu $\vec{E}$.

Forța electrică are următoarele componente pe Ox și Oy:

$$F_x = 0 \text{ și } F_y = eE;$$

Rezultă, după legea a II-a a dinamicii $\vec{F} = m\vec{a}$, unde m este masa electronului, iar a accelerația. Mișcarea electronului pe traiectoria ON poate fi descompusă în două mișcări ale proiecției lui pe Ox și Oy:

— *mișcarea electronului după* Ox are o accelerație $a_x = \frac{F_x}{m} = 0$; deci *este o mișcare uniformă*;

— *mișcarea electronului după* Oy are accelerația $a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{eE}{m} = \text{const.}$; deci *este o mișcare uniform accelerată.*

Ecuațiile mișcării, ținînd seama de componenta vitezei inițiale care pe Ox este v_0 și pe Oy este nulă (adică $v_x = v_0$ și $v_y = 0$) sînt:

$$\begin{cases} x_1 = v_0 t \\ y_1 = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E t^2 \end{cases} \tag{3}$$

unde timpul t de parcurgere a segmentului MN este egal cu timpul cît electronul parcurge lungimea OM, adică $t = \frac{x_1}{v_0}$. Eliminînd pe t între cele două ecuații din (3) obținem:

$$y_1 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{E}{v_0^2} x_1^2$$

care este ecuația traiectoriei electronului și reprezintă o *parabolă.*

Dacă U este tensiunea dintre armăturile condensatorului ce sînt la distanța d, avem $E = \frac{U}{d}$ și în fine:

$$\boxed{y_1 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1^2}{v_0^2}} \tag{4}$$

La ieșirea din cîmpul electric, electronul se mișcă după o dreaptă tangentă în punctul N la parabolă, care face cu Ox un unghi α.

Pe ecran, la depărtarea x_2 de condensator, obținem o deviație totală $y = y_1 + y_2$; $y_2 = x_2 \operatorname{tg}\alpha$, iar $\operatorname{tg}\alpha$ este dat de raportul $\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_x}{v_y}$, unde v_y, este componenta vitezei electronului pe Oy la ieșirea din condensator.

$$v_y = a_y t = \frac{eE}{m} \cdot \frac{x_1}{v_0}$$

deci

$$y_2 = \frac{e}{m} \frac{E x_1 x_2}{v_0^2} = \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1 x_2}{v_0^2}$$

și

$$y = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\frac{U}{d}\frac{x_1^2}{v_0^2} + \frac{e}{m}\frac{U}{d}\frac{x_1 x_2}{v_0^2}$$

sau

$$\boxed{y = \frac{e}{m}\frac{U}{2dv_0^2}(x_1^2 + 2x_1x_2)}$$

adică, deviația electronului în cîmp electric uniform este:

— proporțională cu tensiunea U dintre armăturile condensatorului;

— proporțională cu $\frac{e}{m}$ (sarcina specifică a electronului);

— invers proporțională cu pătratul vitezei inițiale v_0 a electronului la intrarea lui în cîmpul electric.

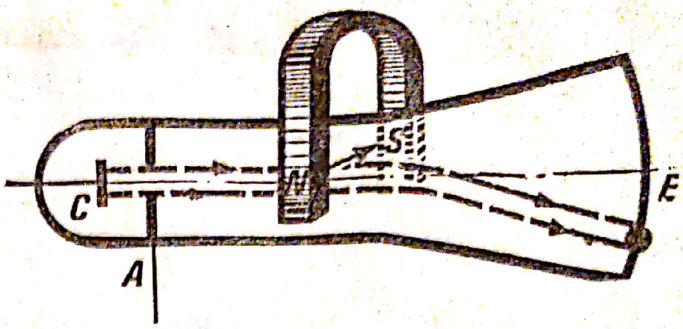
Relația (5) este valabilă pentru orice particulă încărcată deviată într-un cîmp electric uniform.

9.13. **Acțiunea cîmpului magnetic uniform asupra unui fascicul de electroni.** *Experiență.* Se așază un tub Crookes între polii unui magnet în formă de potcoavă (fig. 9.15, *a*); fasciculul de electroni este deviat.

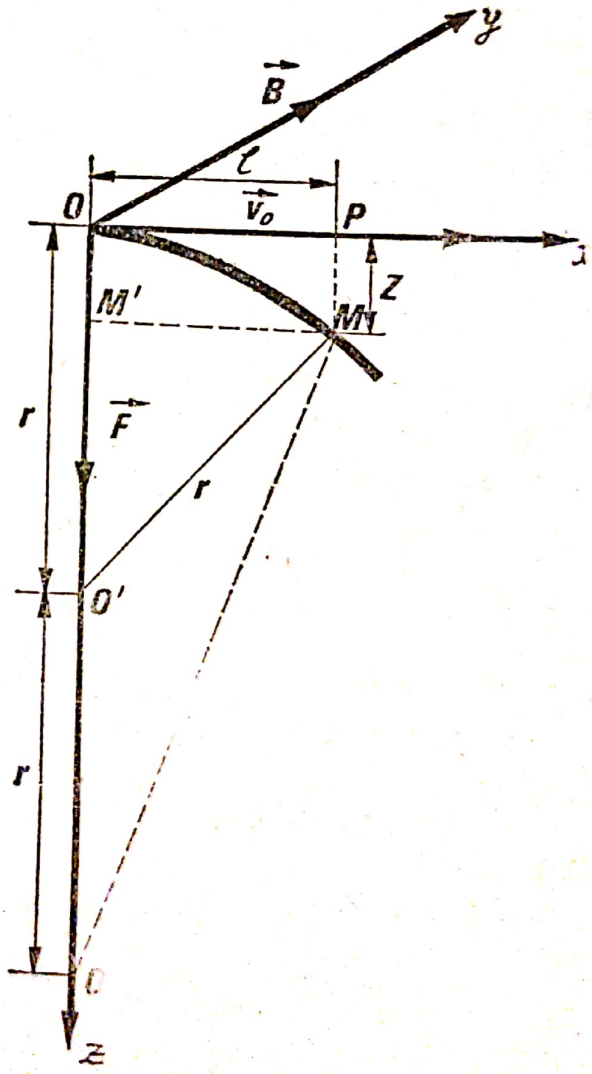
● Un fascicul de electroni este deviat de un cîmp magnetic.

Calculul deviației electronului în cîmp magnetic uniform. Să considerăm un electron care intră cu viteza $\vec{v}_0$ perpendicular pe liniile de cîmp ale cîmpului magnetic uniform de inducție $\vec{B}$ (fig. 9.15, *b*).

Forța lorentziană $\vec{f}$ ($\vec{f} = -e\vec{v} \times \vec{B}$) este, cum s-a arătat și la § 3.12 permanent perpendiculară pe viteza $\vec{v}_0$ și pe inducția magnetică $\vec{B}$ și acționează ca o forță centripetă și, ca urmare, electronul descrie o traiectorie circulară de rază r.



a)



b)

Fig. 9.15

Se poate scrie deci:

$$ev_0 B = \frac{mv_0^2}{r} \tag{6}$$

de unde:

$$\frac{1}{r} = \frac{eB}{mv_0} \tag{7}$$

Pe figura 9.15, *b* deviația electronului este $PM = Z$, în planul xOz.

Dacă însemnăm cu l proiecția lui OM pe Ox, din triunghiul OMO'' se deduce aplicînd teorema înălțimii că:

$$l^2 = Z(2r - Z)$$

Cum deviația este foarte mică, putem considera segmentul $O''M' \approx 2r$, astfel că relația precedentă se mai poate scrie:

$$l^2 = 2Zr$$

de unde :

$$\frac{1}{r} = \frac{2Z}{l^2}$$

și din (7) rezultă:

$$\frac{2Z}{l^2} = \frac{eB}{mv_0}$$

sau

$$\boxed{Z = \frac{eB}{mv_0} \cdot \frac{l^2}{2}} \tag{8}$$

Prin urmare, deviația electronului în cîmp magnetic uniform este:

— proporțională cu inducția magnetică $\vec{B}$;

— proporțională cu sarcina specifică a electronului $\frac{e}{m}$:

— invers proporțională cu viteza inițială $\vec{v}_0$ a electronului la intrarea în cîmpul magnetic.

Relația (8) este valabilă pentru orice particulă încărcată deviată într-un cîmp magnetic uniform.

9.14. **Osciloscopul electronic.** Aparatele care utilizează deviația unui fascicul de electroni, sub acțiunea unui cîmp electric sau magnetic, sînt numeroase. Așa, de exemplu: osciloscopul electronic, microscopul electronic, tuburile videocaptoare și videoreproductoare folosite în televiziune etc.

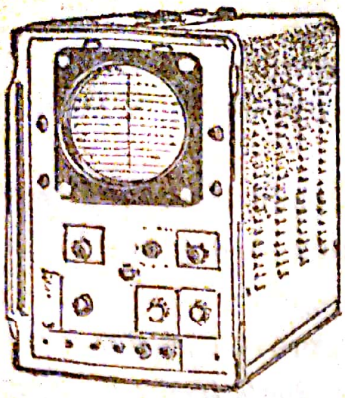


Fig. 9.16

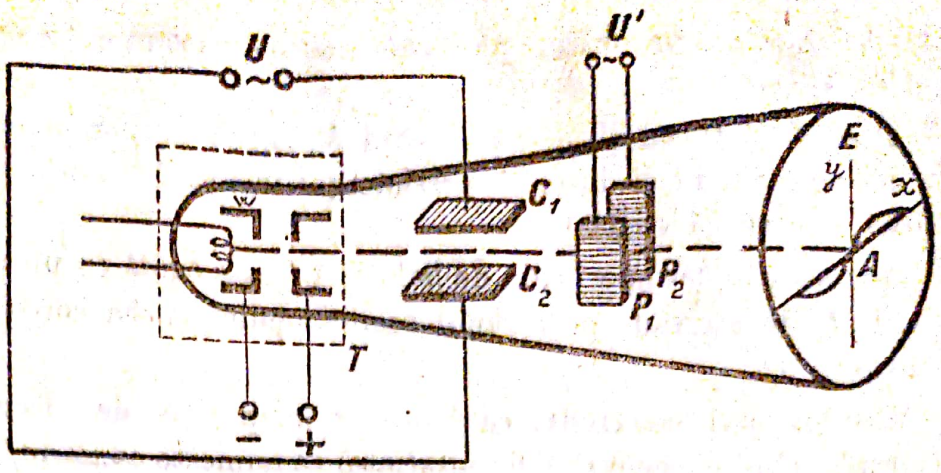


Fig. 9.17

Aici vom descrie numai *osciloscopul electronic* — numit și *osciloscop catodic* (fig. 9.16), care este un aparat folosit în cercetările științifice, în industrie etc. El permite să se studieze tensiuni alternative de înaltă frecvență.

Osciloscopul electronic (fig. 9.17) se compune din următoarele părți principale:

a) *un tun electronic* T care produce un fascicul foarte subțire de electroni;

b) *un condensator* C_1C_2 *cu plăcile orizontale*, legate la tensiunea periodică U de studiat;

c) *un condensator* P_1P_2 *cu plăcile verticale*, legate la tensiunea U', numită *tensiune de baleiaj*, care trebuie să fie periodică, de frecvență reglabilă, în așa fel ca perioada ei să fie un multiplu întreg al perioadei tensiunii U de studiat. Tensiunea de baleiaj, numită în „dinți de fierăstrău" (fig. 9.18), variază liniar cu timpul de-a lungul unei perioade;

d) *un ecran fluorescent* E, constituit din peretele de sticlă ce are depus pe partea interioară un strat de substanță fluorescentă (spre exemplu wolframat de cadmiu). Punctul de pe ecran, de incidență a fasciculului de electroni, emiși de tunul electronic, devine un punct luminos.

Dacă aplicăm o tensiune periodică U, numai pe condensatorul C_1C_2, fasciculul de electroni este deviat vertical *(deflexie verticală)*, pe ecran observîndu-se o deplasare pe ordonata Ay (fig. 9.17), proporțională cu valoarea instantanee a tensiunii U. Dacă aplicăm o tensiune U' numai pe condensatorul P_1P_2, fasciculul de electroni este deviat orizontal *(deflexie orizontală)* și pe ecran provoacă o deplasare de abscisa Ax, care este proporțională cu timpul (fig. 9.18). Dacă aplicăm simultan tensiunile U și U' pe condensatorii C_1C_2 și P_1P_2, în timpul unei perioade,

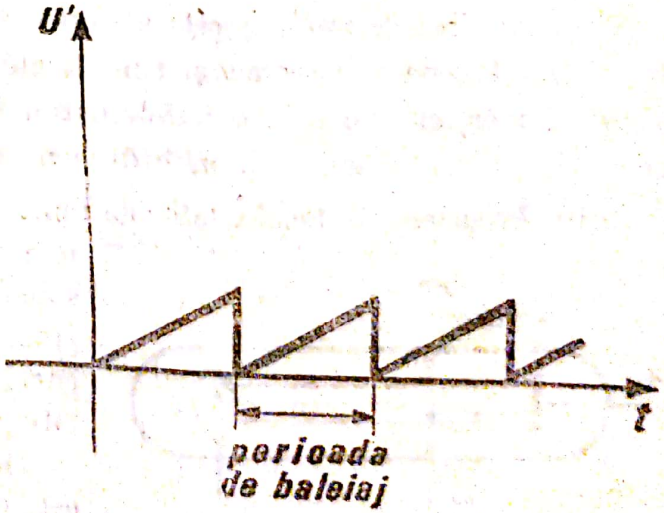


Fig. 9.18

punctul luminos va descrie pe ecran o curbă, care reprezintă variația lui U în funcție de timp.

Cînd U și U' au aceeași frecvență N, curba se reproduce identic cu ea însăși de N ori pe secundă și datorită persistenței imaginilor luminoase, pe ecran se vede o curbă luminoasă continuă.

În cazul în care perioada de baleiaj U' este egală cu un multiplu întreg n a tensiunii U de studiat, pe ecranul osciloscopului curba corespunde la n perioade ale tensiunii U.

Osciloscopul electronic care are un dispozitiv de înregistrare a curbelor (spre exemplu cînd curbele sînt fotografiate) se numește *oscilograf electronic* (sau *oscilograf catodic*).

Observație. Osciloscopul electronic descris mai sus se bazează pe acțiunea cîmpului electric asupra unui fascicul de electroni. Dacă înlocuim condensatoarele prin bobine, se folosește acțiunea cîmpului magnetic produs de acestea. Deflexia electronilor în cîmp magnetic este utilizată la tuburile cinescop.

C. Fascicule de ioni

9.15. Producerea fasciculelor de ioni. Într-un tub Crookes care are catodul străbătut de unul sau mai multe canale, se observă pe lîngă fasciculul de electroni, un alt fascicul de radiații care trec prin canalele catodului în sens opus (fig. 9.19). Aceste radiații au fost descoperite de *E. Goldstein* (1850—1930) în anul 1886 și au fost numite *radiații canal* (sau *radiații pozitive*).

Acest fascicul de radiații este format din ioni pozitivi, care iau naștere mai ales în spațiul întunecat Crookes și sînt accelerați în cîmpul electric către catod, unde datorită inerției trec prin canalele catodului în spatele lui și produc luminescența gazului: gălbui în aer, roz în hidrogen, galben-roșcat în azot etc.

9.16. Proprietățile fasciculelor de ioni. Fasciculele de ioni pozitivi, ca și fasciculele de electroni, produc fluorescența unor substanțe, ca de exemplu a silicatului de zinc, a wolframatului de calciu etc., au energie cinetică și impresionează o placă fotografică.

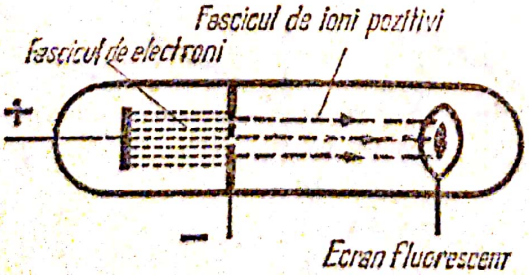


Fig. 9.19

De asemenea un fascicul de ioni pozitivi este deviat într-un cîmp electric și magnetic, dar în sens contrar unui fascicul de electroni.

Scanned with OKEN Scanner

În ceea ce privește mărimea deviației ionilor pozitivi în cîmp electric, se constată că ea este tot atît de mare ca și a electronilor, dacă ambele particule sînt accelerate de aceeași tensiune*.

Într-un cîmp magnetic ionii pozitivi sînt deviați mai puțin decît electronii; ne explicăm aceasta, ținînd seamă de formula (8), care arată că devierea unei particule electrizate într-un cîmp magnetic este invers proporțională cu masa particulei. Cunoscînd că masa unui ion pozitiv de hidrogen este de circa 1 836 ori mai mare decît a unui electron, pentru a obține aceeași deviație ca a unui electron, trebuie să folosim un cîmp magnetic de cel puțin 1 836 ori mai intens.

Fasciculele de ioni pozitivi sînt folosite în *spectrograful de masă* pentru determinarea compoziției izotopice a unei substanțe.

D. Plasmă

9.17. **Proprietățile plasmei.** Fizicianul american *Irving Langmuir* (1881—1957) a dovedit experimental, în 1922, că în tuburile de descărcare, în coloana pozitivă, intensitatea cîmpului electric are valoare mică, ceea ce înseamnă că concentrația sarcinilor pozitive este aproape egală cu a sarcinilor negative. Această stare specială în care se găsește gazul ionizat în tubul de descărcare a primit denumirea de *plasmă*.

● Prin plasmă înțelegem un amestec, neutru din punct de vedere electric, de ioni pozitivi și electroni în stare liberă.

Plasma este considerată ca cea de-a patra stare de agregare a materiei pe lîngă stările: solidă, lichidă și gazoasă. În univers substanțele se găsesc într-un raport de 99,9% în stare de plasmă. Pămîntul și planetele reci fac excepție de la această stare generală. Totuși, în pătura din atmosferă care înconjoară Pămîntul la înălțimi cuprinse între 80—90 km (și chiar mai mult), gazul se găsește în stare de plasmă. Ionizarea gazului în această regiune se datorește radiației solare. De asemenea în straturile superioare ale atmosferei, în *aurorele polare* aerul este în stare de plasmă.

Aurora polară se prezintă ca o lumină difuză, de culoare uneori verde-pal, alteori roșiatică, sub formă de benzi, draperii (planșa 3), coroane etc. Formarea aurorei polare se explică prin faptul că Soarele pe lîngă lumină și căldură emite și electroni,

---

* În adevăr, din $\frac{1}{2}mv_0^2 = eU_0$ rezultă $v_0^2 = \frac{2eU_0}{m}$. Înlocuind în

$y = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\frac{U}{dv_0^2}(x_1^2 + 2x_1x_2)$; după simplificări se obține

$y = \frac{1}{4d}\frac{U}{U_0}(x_1^2 + 2x_1x_2)$, adică deviația este independentă de sarcină.

care, deviați în regiunea atmosferei polare de cîmpul magnetic terestru, produc ionizarea aerului rarefiat din straturile superioare ale atmosferei.

În regiunea din canalul descărcării unui fulger, aerul este tot în stare de plasmă.

Plasma din tuburile de descărcare, din aurorele polare etc., în care temperatura gazului ionizat nu depășește cîteva zeci de grade Celsius se numește *plasmă rece*.

Plasma în flăcările de temperatură înaltă în care ionizarea gazului se face pe bază termică se numește *plasmă fierbinte*.

9.18. Aplicațiile plasmei în tehnică. Plasma are o mare importanță tehnică datorită numeroaselor sale utilizări. Așa, de exemplu, în industria metalurgică pentru sudarea și tăierea metalelor, a betoanelor, a rocilor etc., se folosește un dispozitiv special numit *plasmotron*, care produce un jet de plasmă. În plasmotron (fig. 9.20) între cei doi electrozi legați la o sursă de curent continuu, cu o tensiune de circa 300 V, la un curent de 1 000 A, are loc o descărcare în arc.

Introducînd în camera de ardere un gaz (argon, heliu, hidrogen sau azot) el se proiectează în exterior, prin orificiul practicat în anod, sub forma unui jet de plasmă lung de 5—10 cm, cu diametrul de 5—10 mm. Temperatura jetului de plasmă în canalul central atinge 50 000°C.

În prezent se caută noi metode pentru transformarea energiei termice în energie electrică, excluzînd fazele intermediare. Unul din aceste procedee bazat pe proprietățile gazului în stare de plasmă este folosirea *generatorului magnetohidrodinamic**. În principiu el constă dintr-un jet de plasmă ce intră într-un cîmp magnetic intens, ale cărui linii de forță sînt perpendiculare pe direcția de mișcare a jetului. În acest cîmp magnetic sarcinile electrice de semne contrare se separă, fiind colectate de doi electrozi. Generatorul magnetohidrodinamic este în stadiul de cercetare. Randamentul generatorului este de peste 60%.

Plasma a început să fie folosită tot mai mult pentru producerea unor reacții chimice. Așa, de exemplu, obținerea acetilenei se face trecînd un curent de gaz metan în plasma descărcărilor unui arc electric. Plasma descărcărilor în arc se folosește și la sinteza amoniacului din amestec de hidrogen și azot sau a ciclopentadienei (materie primă pentru fabricarea cauciucului sintetic) din metan etc.

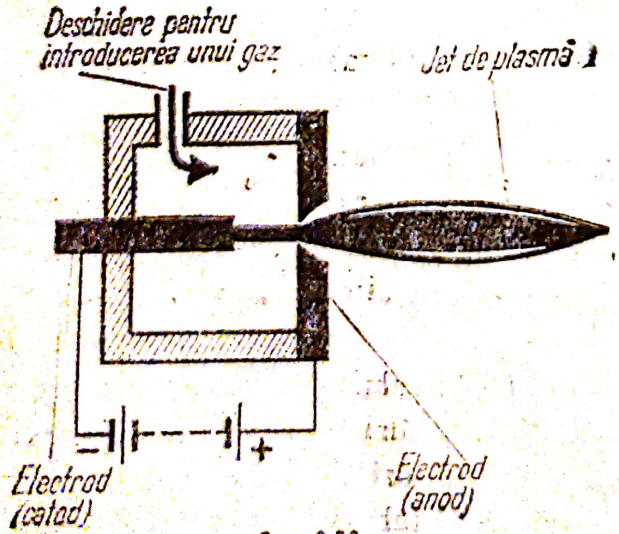


Fig. 9.20

În fine, cercetări actuale se desfășoară în sensul folosirii plasmei pentru producerea *reacțiilor termonucleare*.

9.19. Lămpi cu luminescență. Iluminatul electric este o aplicație importantă a electricității. Lămpile cu incandescență folosite pentru iluminat dau numai circa 2,5% din energia electrică

* Vezi § 3.

primită, sub formă de energie luminoasă, iar restul de 97,5% se transformă în energie termică. O mărire sensibilă a randamentului acestor lămpi nu este posibilă, deoarece toate corpurile solide incandescente emit o bună parte din radiația lor în afara spectrului vizibil. Din această cauză s-au căutat noi căi pentru iluminat. Astfel s-a încercat să se folosească fenomenele care au loc în cazul trecerii curentului electric prin gaze rarefiate.

S-au construit diferite feluri de lămpi, care au la bază o descărcare luminescentă între doi electrozi aflați într-un tub cu anumite gaze, care se numesc *lămpi* (sau *tuburi*) *luminescente*. Cele mai cunoscute sînt: tuburile cu neon (dau lumină roșie), cu vapori de sodiu (dau lumină galbenă), cu vapori de mercur (dau lumină alb-albăstruie).

În aceste tuburi de descărcare, gazul este în stare de plasmă, datorită ionizărilor produse de electroni în cîmpul electric dintre electrozi.

Unele din aceste tuburi luminescente sînt folosite la reclamele luminoase; ele se numesc *tuburi Geissler*, după numele constructorului lor *H. Geissler* (1815—1879).

Tuburile fluorescente sînt de asemenea tuburi cu luminescență care conțin sub o presiune de circa 0,6 $\frac{N}{m^2}$, argon sau heliu amestecat cu vapori de mercur. Pe partea interioară a tubului se aplică un strat subțire dintr-o substanță fluorescentă numită *luminofor*, ca de exemplu: fosfatul de calciu, sulfura de zinc etc.

În timpul descărcării, în gazul din tub se emit radiații, care în cea mai mare parte sînt radiații ultraviolete. Ele iluminează luminoforul, care absoarbe radiațiile ultraviolete și emite raze de lumină vizibilă. O alegere potrivită a luminoforilor face ca tubul să dea o lumină albă ca a zilei, sau o lumină cu o nuanță roz pentru iluminatul interioarelor. Emisia de lumină la tuburile luminescente și fluorescente nu este obținută la temperaturi mari ca în cazul lămpilor cu incandescență, de aceea ele se mai numesc și surse de lumină rece.

Randamentul tuburilor fluorescente este de 3 ori mai mare decît al lămpilor cu incandescență.

Pentru ca tubul fluorescent să poată funcționa cu o tensiune de la rețea, se utilizează un circuit special de aprindere în care se găsește un *starter* S (fig. 9.21). Acesta constă dintr-un tub mic umplut cu gaz inert, în care se găsesc doi electrozi dintre care unul este format dintr-o lamă bimetalică, care la încălzire se încovoaie și atinge celălalt electrod.

La aplicarea tensiunii, prin închiderea întrerupătorului K în starter se produce o descărcare prin scînteie, care este însoțită de o încălzire și o îndoire a electrodului cu bimetal, ceea ce provoacă un contact între electrozi. În acest caz se produce o închidere a circuitului rețelei prin cei doi electrozi ai tubului T și ei devin incandescenți. Acum lama bimetalică se răcește și revine la poziția inițială, deoarece descărcarea luminescentă în starter încetează la contactul dintre electrozi. În acest fel

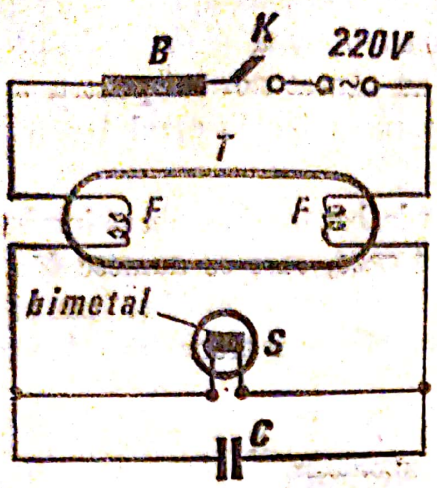


Fig. 9.21

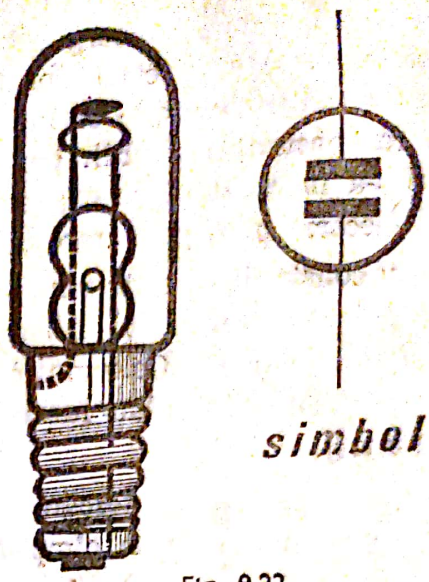


Fig. 9.22

curentul este întrerupt și ca urmare la bornele bobinei B se produce o creștere bruscă de tensiune (un șoc electric), care se transmite electrozilor tubului și în tubul T are loc o descărcare electrică (se produce aprinderea tubului).

După aprindere, bobina limitează intensitatea curentului în plasma din tub la valoarea necesară pentru funcționare. În schema din figura 9.21 este indicat și un condensator C conectat în paralel cu starterul; el are rolul de a forma un scurt circuit pentru undele de înaltă frecvență, care se produc în tub în timpul funcționării lui.

La noi în țară se fabrică tuburi fluorescente la „Electrofar" București.

9.20. Lampa cu neon. O lampă cu descărcări luminescente de tip particular, care se folosește pentru semnalizări, ca becuri de control, în radiotehnică etc., este *lampa* (numită și *becul*) *cu neon* (fig. 9.22). Ea este construită dintr-un tub de sticlă ce conține neon la presiune redusă și doi electrozi (în formă de placă, inel, cilindru, fir etc.), din fier sau aluminiu. Prin bec trece curent electric numai dacă tensiunea de la bornele lui ajunge la tensiunea de aprindere, tensiune care depinde de tipul becului. Spre exemplu becurile cu neon tip *N-25* pentru 120 V și 220 V, fabricate la „Electrofar" București, au tensiunea de aprindere $U_{ap} = 80$ V, iar intensitatea curentului în momentul aprinderii este de circa 10^{-2} A.

Trecerea curentului electric prin becul cu neon este însoțită de o luminescență de culoare roșiatică-portocalie, care crește în intensitate odată cu intensitatea curentului. În cazul unei tensiuni continue, luminescența se obține doar la catod, iar în cazul unei tensiuni alternative, luminescența apare în jurul ambilor electrozi.

Pentru a evita deteriorarea becului cu neon, el se montează totdeauna în serie cu o rezistență care limitează curentul (această rezistență este montată deseori în soclul becului).

Probleme rezolvate

1. Într-un tub Crookes, tensiunea dintre anod și catod imprimă electronilor, a căror masă este $m = 9 \cdot 10^{-31}$ kg, o viteză $v_0 = 30\,000$ km/s. Să se calculeze energia cinetică a unui electron.
2. Un galvanometru pus în circuitul anod-catod indică trecerea unui curent de intensitate $I = 0{,}048$ mA. Să se determine numărul de electroni care sosesc pe secundă la anod. Sarcina electrică a unui electron este $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$C.
3. Anodul este constituit dintr-o placă de platină cu masa de 0,3 g. Să se determine cu cît se ridică temperatura plăcii în timp de un minut, presupunînd că toată energia cinetică se transformă în căldură și că nu este nici o pierdere de căldură. Se dă căldura specifică a platinei $c = 133$ J/kg·grd.
4. Fasciculul de electroni cu viteza $\vec{v}_0$, de direcție orizontală, pătrunde între armăturile plane și orizontale AB și CD ale unui condensator; lungimea armăturilor este $l = 10$ cm; între armături este un cîmp electric uniform, normal pe armături de intensitate $E = 16\,000$ V/m.

   a) Știind că o particulă electrizată de sarcină q, aflată într-un cîmp electric $\vec{E}$ este supusă unei forțe $\vec{F} = q\vec{E}$, să se determine caracteristicile forței la care este supus un electron între armăturile condensatorului.

   b) Să se verifice că greutatea unui electron este neglijabilă față de forța precedentă.

   c) Să se determine traiectoria unui electron între armăturile condensatorului; să se calculeze deviația suferită de fascicul în planul vertical pe $\vec{v}_0$ și sprijinîndu-se pe marginile B și D ale condensatorului.

(Bacalaureat; Réunion 1966).

1. $W_c = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} 9 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{14} = 40{,}5 \cdot 10^{-17}$ J $= 2531$ eV.

2. $Q = I \cdot t = 48 \cdot 10^{-6}$ C,

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{48 \cdot 10^{-6}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 3 \cdot 10^{14} \text{ electroni.}$$

3. $$t = \frac{W}{mc} = \frac{40{,}5 \cdot 10^{-17} \cdot 3 \cdot 10^{14} \cdot 60}{3 \cdot 10^{-4} \cdot 133} = 205{,}2 \text{ grd.}$$

4. *a)* Electronul de sarcină $q = -e$ este supus unei forțe $\vec{F}$ astfel că:

$$\vec{F} = q\vec{E} = -e\vec{E}$$

   — forța este dirijată în sens contrar cîmpului;
   — deoarece cîmpul este uniform ($E = \text{const.}$), forța este constantă.
   Forța electrică este:

$$F = eE = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 10^3 = 2{,}56 \cdot 10^{-15} \text{ N}$$

   b) Greutatea electronului de masă $m = 9 \cdot 10^{-31}$ kg este:

$$G = mg = 9 \cdot 10^{-31} \cdot 9{,}8 = 8{,}82 \cdot 10^{-30} \text{ N}$$

   raportul $\frac{F}{G} = 0{,}29 \cdot 10^{15}$, deci G este neglijabil față de F.

   c) Vezi figura 9.14 și formula (4).

$$y = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{U}{d} \frac{x_1^2}{v_0^2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{Ex_1^2}{v_0^2}$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{14}} = 1{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

Scanned with OKEN Scanner

Întrebări, exerciții, probleme

1. Ce deosebire este între trecerea curentului prin gaze și prin electroliți?
2. De ce un conductor izolat electrizat nu-și păstrează mult timp încărcarea electrică?
3. De ce se produc fulgerele și trăznetele?
4. De ce la arcul electric în curent continuu electrodul pozitiv din cărbune se face cu un diametru mai mare decît cel de la catod?
5. De ce lampa cu vapori de mercur are tubul din cuarț și nu din sticlă obișnuită?
6. De ce un fascicul de electroni este deviat de un cîmp electric sau magnetic?
7. De ce este necesară introducerea electronvoltului pentru măsurarea energiei electronului?
8. De ce osciloscopul electronic poate servi pentru măsurarea relativă a diferenței de potențial?
9. De ce ionii pozitivi accelerați în cîmpul electric dintre anod și catod trec prin canalele catodului în cazul unui catod perforat?
10. De ce plasma spre deosebire de gaze are o conductibilitate electrică mai mare?
11. De ce tuburile fluorescente au un randament mai bun decît lămpile cu incandescență?
12. Care este rolul starterului în circuitul unui tub fluorescent?
13. Într-un tub în care s-a făcut vid, catodul incandescent emite electroni fără viteză inițială. Acești electroni sînt accelerați de o tensiune constantă de 400 V, stabilită între catod și anod depărtați la 4 cm.
    a) Să se calculeze cîmpul electric uniform ce există între electrozi;
    b) la ce forță este supus un electron al fasciculului?
    c) să se calculeze accelerația care va fi imprimată electronului;
    d) care este viteza electronului la sosirea lui pe anod;

    Răspuns: $E = 10^4 \frac{V}{m}$; $F = 1{,}6 \cdot 10^{-15}$; $a = 18 \cdot 10^{14}$ m/s²; $v = 12\,000$ km/s.

14. Cîmpul electric creat între catod și anodul unui tub în care s-a făcut vid accelerează electronii și le imprimă o viteză de 12 000 km/s.
    a) Să se calculeze energia cinetică a electronului.
    b) Fasciculul de electroni întîlnește o placă de platină cu masa de 4 g. Un miliampermetru așezat în circuitul tubului arată un curent de 0,08 mA. Să se calculeze cu cîte grade se mărește temperatura plăcii de platină după 40 s. Se dă căldura specifică a plantei $c = 133$ J/kg · grd.

    Răspuns: $W = 405$ eV; $t = 2{,}4$ grd.

15. Viteza unui electron pentru o tensiune de accelerare a unui tub Crookes de 10 000 V este de 58 340 km/s, iar a unui ion pozitiv pentru aceeași tensiune este de 14 000 km/s. De ce viteza ionului pozitiv este mult mai mică în comparație cu a electronului?

16. Într-un cîmp electric transversal, uniform, de intensitate $E = 45\,000$ V/m, pătrunde un fascicul de ioni pozitivi a căror viteză este $v = 2\,000$ km/s. Devierea fasciculului de la direcția inițială este $y = 2{,}15$ cm pentru un drum parcurs de 20 cm. Să se calculeze sarcina specifică a ionului pozitiv.

    Răspuns: $\frac{q}{m} = 0{,}95 \cdot 10^8$ C/kg.

17. Un electron pătrunde cu viteza de $4 \cdot 10^7$ m/s, perpendicular pe liniile cîmpului electrostatic dintre plăcile unui condensator plan, lung de 4 cm, cu distanța dintre plăci de 1,6 cm avînd aplicată tensiunea de 910 V. Se neglijează variația relativă a masei cu viteza. Se cere

Scanned with OKEN Scanner

a) forța ce acționează asupra electronului între plăcile condensatorului;
b) ecuația traiectoriei electronului;
c) viteza electronului la ieșirea dintre plăcile condensatorului;
d) deviația electronului produsă pe un ecran fluorescent aflat la 10 cm de extremitatea plăcilor condensatorului perpendicular pe ele;
e) forma traiectoriei electronului și raza de curbură dacă el pătrunde într-un cîmp magnetic de inducție $9{,}1 \cdot 10^{-4}$ T, aflat în locul condensatorului.
Experiența se petrece în vid.

(Concursul de fizică, etapa locală, 1969)

Răspuns: *a)* $F = 9{,}1 \cdot 10^{-15}$ N; *b)* $y_1 = \frac{25}{8} x^2$; traiectoria este o parabolă; *c)* $v = 10^7\sqrt{17}$ m/s; *d)* $y = 3$ cm; *e)* $r = 25$ cm.

10. Tuburi electronice

1. Dioda

10.1. **Emisia termoelectronică.** Thomas Edison (1847—1931) a arătat în anul 1884 că metalele incandescente emit electroni.

● Emiterea de electroni de către metale (sau de alte conductoare), prin încălzire la incandescență se numește **emisie termoelectronică.**

Fenomenul de emisie termoelectronică este analog cu evaporarea moleculară a lichidelor. Așa, de exemplu, numărul moleculelor substanței ce se evaporă, ca și numărul de electroni emiși de un metal, crește cu temperatura. Analog căldurii de vaporizare a lichidelor, pentru emisia termoelectronică este *energia de extracție*, care este energia ce trebuie dată unui electron spre a putea ieși din conductor.

10.2. **Dioda.** Fenomenul emisiei termoelectronice se utilizează în *tuburile electronice. Dioda* este un tub electronic, constituit dintr-un tub de sticlă sau de metal, în care s-a făcut vid înaintat și care are doi electrozi: *catodul (C)* și *anodul (A)* (fig. 10.1.). Ea a fost inventată de *John Fleming* (1849—1945) în anul 1904.

Catodul este un *filament* din wolfram, care poate fi adus la incandescență prin trecerea unui curent electric dat de o *baterie de încălzire* B_f; în acest caz catodul este cu *încălzire directă.*

Adesea filamentul încălzește o suprafață metalică acoperită cu un strat de oxid de bariu, calciu sau stronțiu. Acești oxizi emit electroni mai intens și la o temperatură mai mică decît metalele; catodul este, în acest caz, cu *încălzire indirectă* (fig. 10.2.) și poate fi alimentat cu un curent alternativ.

Scanned with OKEN Scanner

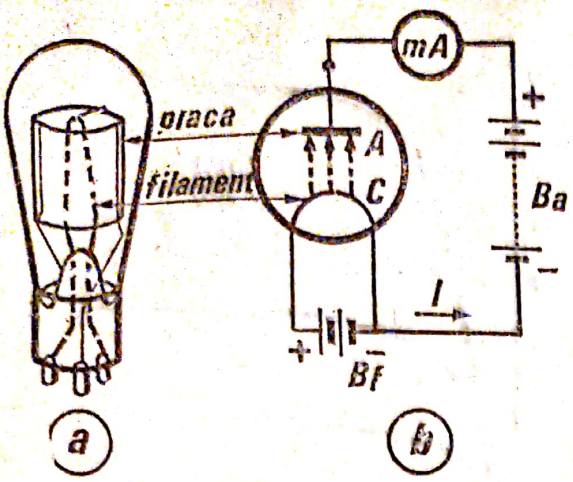


Fig. 10.1

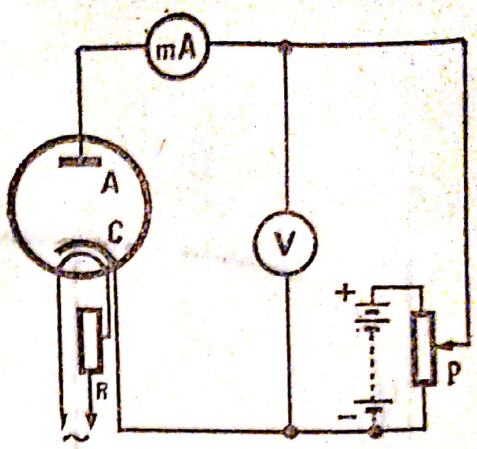


Fig. 10.2

Circuitul format din bateria de încălzire și filament se numește *circuit de încălzire* al filamentului (fig. 10.1).

Anodul constă dintr-o *placă* metalică A (de nichel, molibden etc.) așezată în fața catodului. Între catod și anod se aplică o tensiune de la o *baterie anodică* B_a, unde polul pozitiv al bateriei se leagă la placă, iar polul negativ la filament; se realizează astfel *circuitul anodic*.

Dacă circuitul de încălzire este întrerupt, filamentul este rece, iar miliampermetrul mA, conectat la circuitul anodic, nu indică trecerea unui curent electric. Cînd filamentul este adus la incandescență, se constată că acul galvanometrului deviază. Sensul acestei deviații arată că: de la placă la filament și prin circuitul exterior circulă un curent electric.

Funcționarea diodei. Dacă tensiunea aplicată anodului (numită tensiune anodică U_a) este zero și filamentul este adus la incandescență, electronii emiși de catod, în absența cîmpului electric ($U_a = 0$), vor fi atrași de filament care se va încărca pozitiv (pentru că a pierdut sarcini negative). Prin urmare în vecinătatea catodului, electronii formează un *nor electronic* ce împiedică ieșirea în continuare a electronilor din catod.

Cînd se aplică anodului o tensiune U_a mai mare ca zero, între filament și placă se creează un cîmp electric, electronii sînt dirijați spre anod și în circuitul anodic apare curentul anodic I_a.

Intensitatea curentului anodic depinde de:

— *tensiunea anodică*;

— *temperatura catodului*.

Experiența 1. Se folosește montajul reprezentat în figura 10.2. Se menține constantă intensitatea curentului de încălzire a filamentului, deci și temperatura catodului și se mărește tensiunea anodică cu ajutorul potențiometrului P. Notăm tensiunea anodică indicată de voltmetrul V și intensitatea curentului anodic arătată de miliampermetrul mA. Se trasează curba reprezentînd variația curentului anodic I_a,

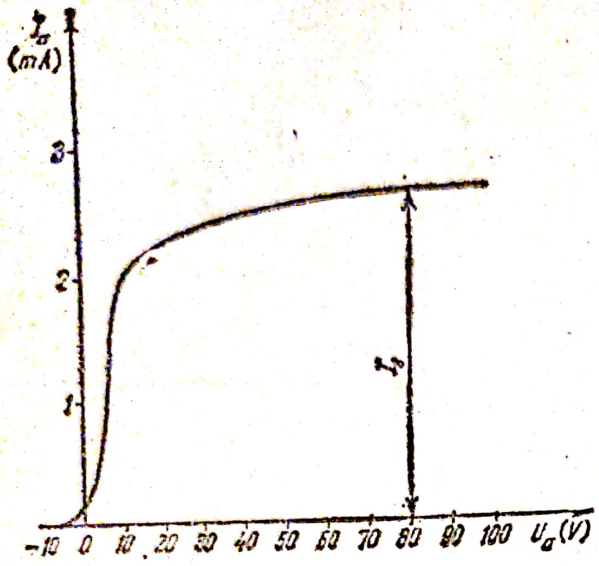


Fig. 10.3

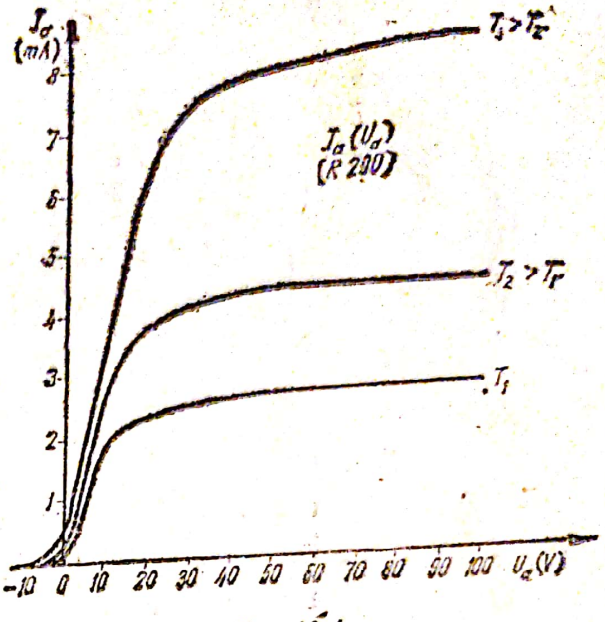


Fig. 10.4

în funcție de tensiunea anodică U_a, care se numește *caracteristica diodei* (fig. 10.3)*. Ea ne arată că pe măsură ce crește tensiunea anodică, crește și intensitatea curentului anodic, deoarece cîmpul electric dintre catod și anod crește și un număr din ce în ce mai mare de electroni sînt captați de anod.

Pentru o tensiune anodică suficient de mare, intensitatea curentului anodic rămîne constantă și atinge o valoare maximă, numită *curent de saturație* I_s. În acest caz *toți* electronii emiși de catod în unitatea de timp sînt atrași de anod și de acum înainte chiar dacă se mărește tensiunea anodică curentul anodic rămîne constant.

Experiența 2. Se mărește curentul de încălzire, deci și temperatura filamentului, cu ajutorul reostatului R (fig. 10.2) și reluăm experiența. Se constată că intensitatea curentului de saturație crește cu temperatura filamentului. Acest rezultat este redat în figura 10.4 în care se arată 3 curbe caracteristice ale aceleiași diode, pentru diferite temperaturi ale filamentului.

Ridicarea temperaturii filamentului produce o creștere a agitației termice și face ca un număr mai mare de electroni să iasă din filament. Prin urmare, intensitatea curentului de saturație, proporțională cu numărul de electroni extrași, crește cu temperatura.

10. 3. Dioda ca redresoare. Dacă în montajul din figura 10.2 se inversează polaritatea electrozilor, adică unim filamentul cu polul pozitiv și placa cu polul negativ al bateriei anodice, nu se obține curent anodic $I_a = 0$, deoarece electronii emiși de catod sînt respinși de anod și atrași de catod. Prin urmare *dioda are o conductibilitate unilaterală*, ea nu lasă să treacă curentul decît în sensul anod-catod prin circuitul exterior. Această proprietate a diodei este folosită pentru redresarea curentului alternativ introdus sau indus în circuitul anodic.

* Figurile 10.3 și 10.4 reprezintă caracteristicile diodei R 290.

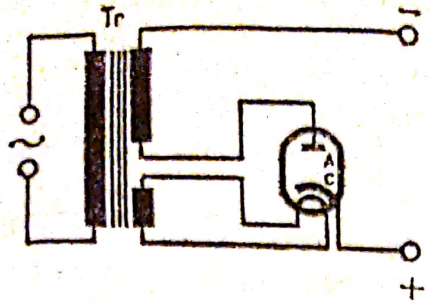


Fig. 10.5

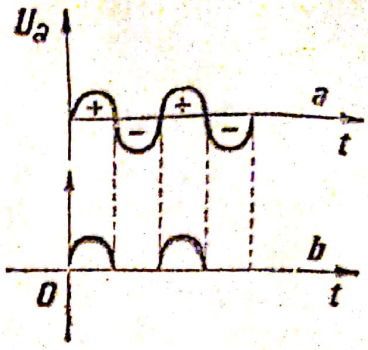


Fig. 10.6

Experienţă. Se introduce secundarul unui transformator în circuitul anodic al unei diode (fig.10.5), deci placa este succesiv pozitivă şi negativă (fig.10.6, *a*). Alternanţele pentru care placa este pozitivă trec prin circuitul anodic, acelea pentru care placa este negativă nu pot trece (fig. 10.6, *b*).

În circuitul anodic al diodei se obţine un curent de acelaşi sens, numit *curent redresat. Dioda are rol de redresoare.*

În practică se redresează ambele alternanţe (fig.10.8, *a*, *b*) ale curentului alternativ folosindu-se o *dublă diodă* (fig.10.7), adică o diodă cu două plăci unde pulsaţiile tensiunii sînt netezite (fig.10.8, *c*) cu ajutorul unui *filtru electric* format din două condensatoare C_1 şi C_2 şi o bobină cu miez de fier (bobină de şoc) *B;* filtrul se conectează între bornele 1—2 (fig. 10.7).

Cel mai simplu filtru este format dintr-un condensator, de ordinul zecilor de microfarazi, legat în paralel cu rezistorul de sarcină *R*. În perioada de conducţie a diodei, condensatorul se va încărca, iar în perioada de timp cît dioda nu conduce el se va descărca pe rezistorul de sarcină şi astfel la bornele acestuia tensiunea are pulsaţii mici.

Folosind filtre alcătuite din condensatoare şi bobine de şoc, pulsaţiile tensiunii redresate sînt şi mai mici.

Dioda cu vid înaintat, pentru redresarea curentului alternativ, se mai numeşte şi *kenotron.*

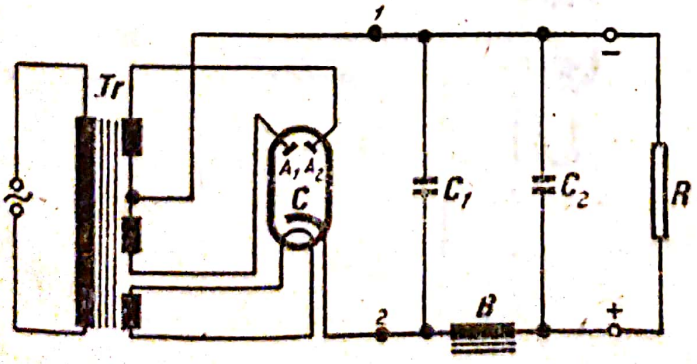


Fig. 10.7

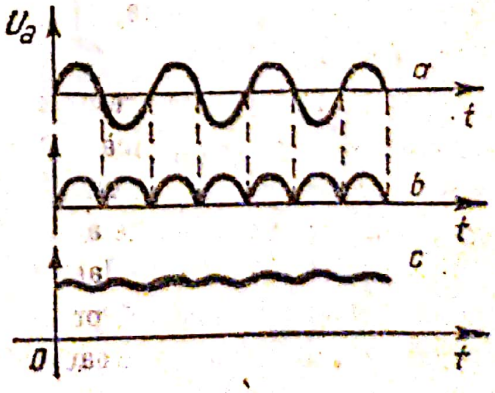


Fig. 10.8

B. Trioda

10.4. **Trioda.** În anul 1906, inginerul american *Lee de Forest* (1873—1961) a introdus între catodul și anodul unei diode un al treilea electrod format dintr-o rețea sau spirală metalică numită *grilă G* (fig.10.9.). S-a obținut astfel un *tub electronic cu trei electrozi* numit *triodă*. Ea cuprinde trei circuite (fig. 10.10):

— *un circuit de încălzire* format dintr-un filament și o baterie de încălzire;

— *un circuit anodic* format din catod, anod, bateria anodică și se închide la catod;

— *un circuit de grilă* format din catod, grilă, potențiometru, care se închide tot la catod.

Aceste trei circuite au o bornă comună *D*. Potențialul catodului se consideră ca potențial zero.

10. 5. **Caracteristicile de grilă.** Pentru a înțelege *funcționarea triodei* să studiem variația intensității curentului anodic I_a în funcție de tensiunea grilei U_g^*, tensiunea anodului U_a și temperatura catodului menținîndu-se constante, folosindu-ne de montajul reprezentat în figura 10.10.

Trasăm graficul funcției $I_a = f(U_g)$ pentru $U_a = \text{const.}$, care se numește *caracteristica de grilă a curentului anodic al triodei* (fig. 10.11) (tema lucrării de laborator nr. 22).

Această caracteristică ne arată că:

— *Pentru o tensiune de grilă negativă suficient de mare, curentul anodic este nul;* spunem că tubul este blocat. În acest caz, grila respinge puternic electronii în așa fel că ei nu pot ajunge la placă.

— *Pentru o tensiune de grilă negativă cuprinsă între tensiunea de blocare a tubului și zero, curentul anodic nu mai este nul* (crește de la zero la I_a).

Electronii sînt de asemenea respinși de grilă, dar unii reușesc să treacă spre placă, deoarece cîmpul electric creat de tensiunea pozitivă a plăcii este mai mare decît cîmpul de sens contrar creat de tensiunea negativă a grilei.

* $U_g = V_g - V_c = V_g$ (se consideră $V_c = 0$).

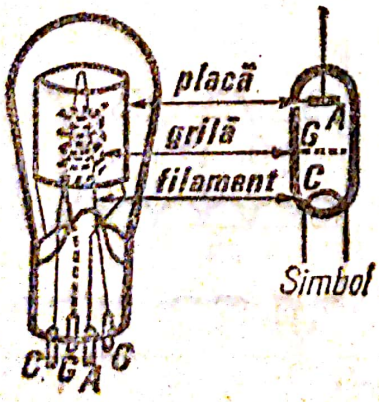


Fig. 10.9

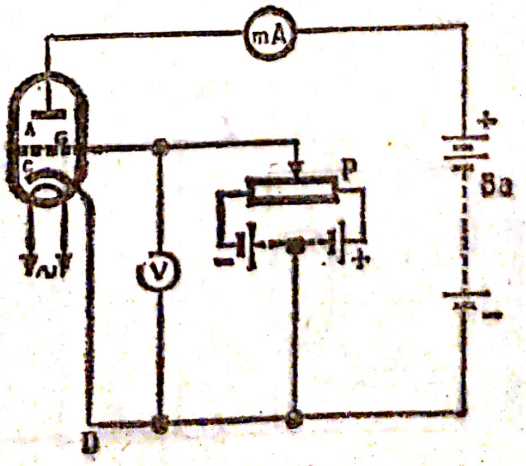


Fig. 10.10

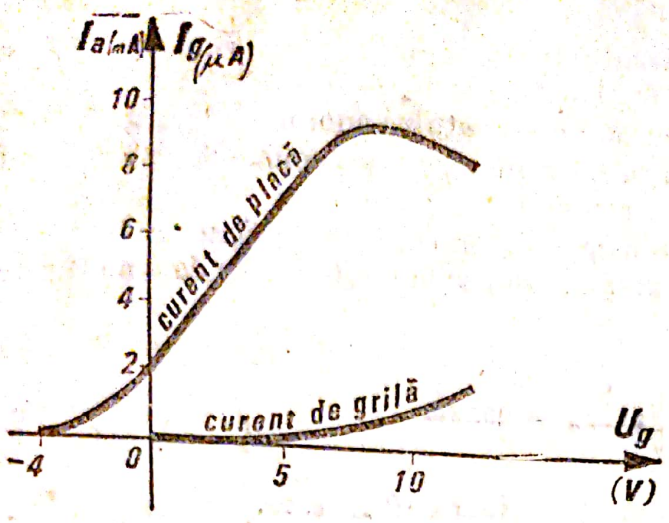


Fig. 10.11

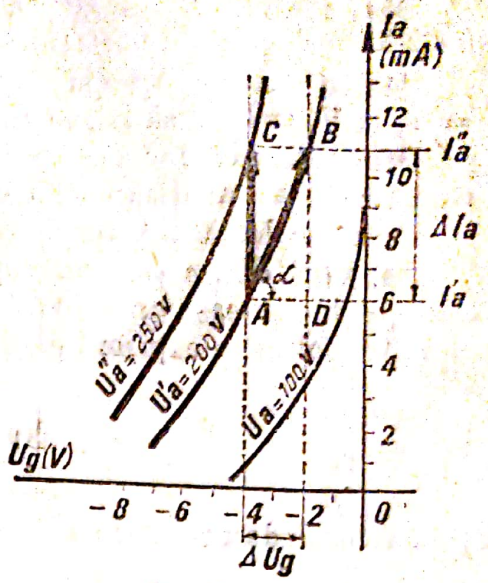


Fig. 10.12

— *Pentru o tensiune de grilă pozitivă, curentul de placă este intens.*

Dacă tensiunea grilei este puternic pozitivă ea atrage un număr de electroni și curentul anodic scade, iar în circuitul de grilă apare un curent de grilă I_g (fig. 10.11). Curba $I_g - U_g$ se numește *caracteristica de grilă a curentului de grilă* numită și *caracteristica de grilă a triodei.*

Funcționarea triodei avînd menținută grila la un potențial pozitiv ridicat, în raport cu catodul, poate deteriora tubul, dacă nu se cunosc valorile maxime ale tensiunilor anodice, care pot fi utilizate în diferite cazuri de lucru. Aceste valori sînt date de cataloagele de tuburi electronice.*

Deci *prin tensiunea ei, grila este un electrod de comandă sau de control asupra intensității curentului anodic.*

Dacă la aceeași triodă se trasează mai multe caracteristici $I_a - U_g$, corespunzînd la diferite tensiuni anodice, obținem o *familie de caracteristici* $I_a - U_g$ (fig. 10.12).

10.6. **Panta caracteristicii.** După cum se vede în figura 10.12, pe porțiunea dreaptă a caracteristicilor $I_a - U_g$ raportul dintre o creștere ΔI_a a curentului anodic și creșterea ΔU_g a tensiunii de grilă, care o determină, este egală cu tangenta unghiului α; el se numește *panta S a caracteristicii:*

$$\boxed{S = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}} \quad U_a = \text{const.} \tag{1}$$

Spre exemplu înclinarea porțiunii drepte a caracteristicii din figura 10.12 este:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{5\text{mA}}{2\text{V}} = 2{,}5\ \text{mA/V},$$

Panta arată cu cîți miliamperi crește curentul anodic, cînd tensiunea grilei crește cu un volt, la o tensiune anodică constantă.

* De exemplu, „Catalog de tuburi electronice" de C. Ionescu și A. Săvescu, Editura Tehnică, 1967.

10.7. Factorul de amplificare. În figura 10.12 se vede că la o variație $\Delta U_g = -2$ V, corespunde o variație $\Delta I_a = 5$ mA, pentru $U_a'' = 200$ V.

Pentru a obține aceeași variație a curentului anodic $\Delta I_a = 5$ m A, pentru $U_g = -4$ V, trebuie să facem să varieze U_a cu $\Delta U_a = U_a'' - U_a' = 50$ V.

Deci putem obține același efect, o creștere a curentului anodic cu 5 m A, fie mărind tensiunea anodică cu 50 V, tensiunea de grilă rămînind constantă, fie mărind tensiunea grilei cu 2 V tensiunea anodică rămînind constantă.

Raportul dintre variația tensiunii anodice ΔU_a *și variația tensiunii grilei* ΔU_g, care produc aceeași variație ΔI_a *a curentului* anodic, se numește **factor de amplificare** μ **al triodei** și se exprimă prin relația:

$$\boxed{\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}} \; ; \; \Delta I_a = \text{const.} \qquad (2)$$

Factorul de amplificare în cazul prezentat în figura 10.12 este:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = 50 \text{ V}/2 \text{ V} = 25.$$

10.8. Rezistența internă. Raportul dintre variația tensiunii anodice ΔU_a și variația corespunzătoare a curentului anodic ΔI_a atunci cînd tensiunea de grilă este constantă se numește *rezistență internă* a triodei și se exprimă prin relația:

$$\boxed{R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}} \; ; \; U_g = \text{const.} \qquad (3)$$

Rezistența internă în cazul prezentat în figura 10.12 este:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{50\text{V}}{0{,}005\text{ A}} = 10\,000\ \Omega.$$

Înmulțind (1) cu (3), membru cu membru și comparînd cu (2) se obține:

$$S \cdot R_i = \mu \qquad (4)$$

care arată că putem obține o triodă cu un factor de amplificare maxim alegînd-o cu panta și rezistența internă cît mai mari cu putință.

10.9. Trioda ca amplificatoare. Una din funcțiile importante ale triodei este funcția de amplificare a tensiunii de joasă frecvență sau a puterii de joasă frecvență sau înaltă frecvență.

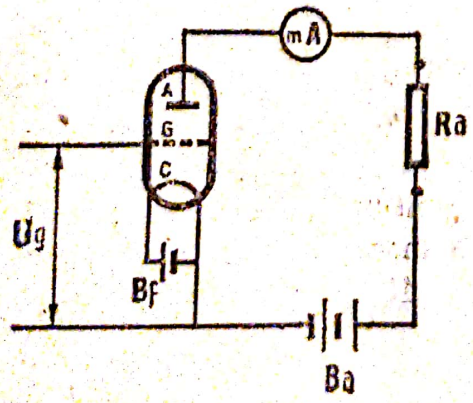


Fig. 10.13

Principiul amplificării este următorul: *mărimea oscilantă de amplificat se aplică circuitului grilei unei triode, iar în circuitul anodic se obține mărimea amplificată.*

Dacă se folosește montajul din figura 10.13 numit *etaj de amplificare*, unde aplicăm grilei, de exemplu, o tensiune alternativă de joasă frecvență $\Delta U_g = 2$ V, curentul anodic obținut, sub influența acestei tensiuni este $\Delta I_a = 5$ m A (v. fig. 10.12). Cunoscînd că rezistența din circuitul anodic (rezistența de sar-

Scanned with OKEN Scanner

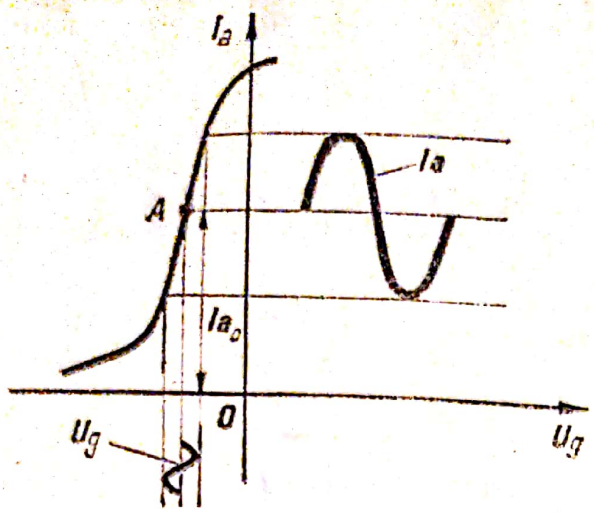


Fig. 10.14

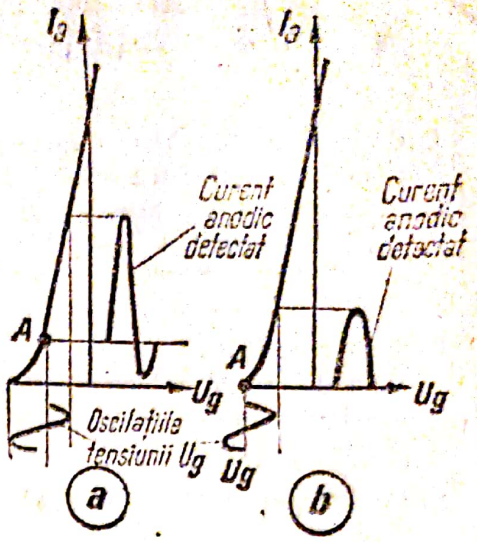


Fig. 10.15

cină) este $R_a = 10\,000\,\Omega$, variația tensiunii anodice de la bornele acestei rezistențe este: $\Delta U_a = \Delta I_a \cdot R_a = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 = 50$ V. Amplificarea tensiunii, în cazul prezentat este de 25 ori și factorul de amplificare al etajului este $\mu = 50$ V/2 V=25.

Valoarea curentului anodic în absența *semnalului electric* (tensiunii alternative de pe grilă) de amplificat se numește curent de repaus I_{a_0}, iar punctul de pe caracteristică corespunzător curentului de repaus se numește *punct de funcționare A*, care în figura 10.14 este situat la mijlocul porțiunii drepte a caracteristicii.

Dacă amplificarea cu o singură triodă nu este suficientă, tensiunea amplificată de prima triodă se aplică pe grila celei de-a doua triode, obținîndu-se în circuitul anodic al acesteia o a doua amplificare; se spune că este un amplificator cu două etaje amplificatoare. Se folosesc amplificatoare și cu 3 etaje.

10.10. **Trioda ca detectoare.** Ca și dioda, trioda poate să funcționeze ca detectoare* de curent alternativ. A detecta un curent alternativ înseamnă fie a-i suprima complet alternanțele de un sens, fie a-i micșora numai amplitudinea alternanțelor de un sens.

Montajul folosit pentru trioda ca detectoare este ca în figura 10.13, unde în spațiul grilă-anod al triodei se obține detectarea semnalului ca la diodă, iar în spațiul grilă-catod se realizează o amplificare a semnalului de joasă frecvență rezultat de pe urma detecției: este *detecția pe grilă*.

La *detecția pe placă* se aplică o tensiune U_g constantă, astfel încît punctul de funcționare A al triodei să fie situat pe cotul inferior al caracteristicii (fig.10.15, *a*), fie la punctul de unde începe caracteristica (fig.10.15, *b*). Peste această tensiune, se suprapun oscilațiile de detectat.

După cum se vede pe figură, o oscilație completă a tensiunii grilei, cu ambele alternanțe egale, în valoare absolută, produce în circuitul anodic o slăbire a unei alternanțe (fig.10.15, *a*) sau o suprimare a unei alternanțe (fig. 10. 15, *b*). În ambele cazuri are loc și o amplificare a oscilației detectate.

* Detecție = redresarea oscilațiilor de radiofrecvență.

Întrebări, exerciții, probleme

1. Ce se numește emisie termoelectronică?
2. Cum este construită dioda și ce funcție îndeplinește?
3. Ce deosebire este între catodul cu încălzire directă și cel cu încălzire indirectă?
4. De ce introducerea unei bobine de șoc în filtrul electric atenuează pulsațiile tensiunii redresate?
5. Cum este construită trioda și ce rol are grila la triodă?
6. Cum funcționează trioda ca amplificatoare și ca detectoare?
7. O diodă are un curent de saturație de 20 mA. Să se calculeze numărul de electroni extrași din filament pe secundă ($e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C).

Răspuns: $12{,}5 \cdot 10^{16}$.

8. Pentru potențiale mici V ale plăcii, intensitatea curentului anodic I_a a unei diode este proporțională cu $V^{\frac{3}{2}}$ (legea lui *Langmuir*). Pentru $V = 9$ volți, intensitatea curentului $I_a = 27$ mA.
Să se calculeze intensitatea curentului pentru potențiale egale cu 5 V, 10 V, 16 V.
Să se traseze curba $I = f(V)$ pentru V cuprins între 0 și 16 volți.

Răspuns: 11,2 mA; 31,6 mA; 64 mA.

9. Să se calculeze factorul de amplificare al unui tub electronic dacă $R_i = 20\,000\ \Omega$ și $S = 4$ mA/V.

Răspuns: $\mu = 80$.

10. Un tub electronic are parametrii: $\mu = 25$ și $S = 2$ mA/V. Să se calculeze rezistența internă a tubului.

Răspuns: $R = 12\,500\ \Omega$.

11. Panta unei triode este $S = 2{,}5$ mA/V. Cu câți miliamperi variază curentul anodic, dacă variem tensiunea grilei de la -2 V la $+3$ V?

Răspuns: $I_a = 12{,}5$ mA.

12. Variația curentului anodic cu 2 mA se obține, într-un tub electronic, fie variind tensiunea anodică cu 50 V, fie variind tensiunea grilei cu 1,25 V. Să se calculeze parametrii tubului: μ, R_i și S.

Răspuns: $\mu = 40$; $R = 25$ kΩ; $S = 1{,}6$ mA/V.

Scanned with OKEN Scanner

11. Semiconductori

1. Curentul electric în semiconductori

11.1. Conductori. Din punct de vedere al conductibilităţilor electrice corpurile solide se împart în trei mari categorii: conductori (metalele), semiconductori şi izolatori.

Metalele au cea mai mare conductibilitate electrică. Rezistivitatea lor este de numai $10^{6} - 10^{8}$ $\Omega \cdot m$. Electronii de valenţă ai atomilor din care este format metalul sînt foarte slab legaţi de atomi, astfel încît în metal legăturile lor cu atomii sînt rupte şi ei se pot deplasa liber. Aşadar metalul este alcătuit dintr-o reţea cristalină, în nodurile căreia se găsesc ioni pozitivi, printre care se mişcă *electronii liberi*. În metale se găsesc aproximativ 10^{28} electroni liberi pe m^3. **Concentraţia electronilor liberi în metale nu variază cu temperatura.** Sub acţiunea unui cîmp electric exterior aplicat metalului, electronii liberi capătă o mişcare dirijată şi apare deci curentul electric. Electronii constituie purtătorii mobili de sarcină electrică. Rezistenţa electrică a metalelor se datoreşte ciocnirilor cu ionii pozitivi ale electronilor acţionaţi de cîmpul extern, în urma cărora este frînată mişcarea lor dirijată. Cu creşterea temperaturii frecvenţa acestor ciocniri se măreşte şi creşte rezistenţa electrică. Aşadar, în metale, temperatura nu influenţează asupra numărului de purtători de sarcină, ci numai asupra mobilităţii lor, ceea ce face ca rezistenţa electrică a metalelor să crească cu creşterea temperaturii.

11. 2. Izolatori. Izolatorii sînt corpuri care practic nu conduc curentul electric. Rezistivitatea lor este enormă, de ordinul $10^{8} - 10^{13}$ $\Omega \cdot m$. Astfel de corpuri sînt de exemplu sarea de bucătărie, mica, ebonita etc. Electronii de valenţă ai atomilor care formează izolatorii sînt foarte strîns legaţi de atomi, astfel încît ei nu se pot

deplasa liber în cristal. **În izolatori nu există practic purtători de sarcină liberi și de aceea ei nu conduc curentul electric.**

11.3. **Semiconductori.** Semiconductorii sînt corpuri a căror rezistivitate este cuprinsă între cea a metalelor și cea a izolatorilor. Substanțele cu proprietăți semiconductoare sînt foarte răspîndite în natură. Cele mai folosite sînt două din elementele grupei a IV-a a tabelului periodic, germaniul și siliciul. Proprietatea caracteristică a semiconductorilor este variația foarte puternică a rezistenței lor cu temperatura și anume *scăderea rezistenței cu creșterea temperaturii*. Astfel, rezistivitatea siliciului* la temperatura camerei este de ordinul $10^3\ \Omega \cdot m$, pe cînd la 700°C scade aproximativ de un milion de ori, ajungînd la numai $10^{-3}\ \Omega \cdot m$. Creșterea conductibilității semiconductorilor cu creșterea temperaturii indică faptul că, spre deosebire de metale, numărul de purtători de sarcină electrică crește cu temperatura. De exemplu, la siliciu, numărul de purtători pe m^3 crește de la 10^{-17} la temperatura camerei la 10^{24} la 700°C, ceea ce explică scăderea rezistivității.

În semiconductori electronii de valență sînt legați de atomi, dar mai slab decît cei ai izolatorilor. Legăturile lor pot fi rupte dacă li se transmite suficientă energie și astfel acești electroni se pot deplasa liber în semiconductor, ca electronii liberi din metale. **Energia minimă necesară pentru trecerea electronilor din stare de electroni legați de atomi în stare de electroni liberi se numește energie de activare.** Energia de activare este o mărime caracteristică fiecărui semiconductor și are valori de ordinul electron-voltului. Energia de activare poate fi transmisă electronilor din semiconductor datorită agitației termice, de aceea, cu creșterea temperaturii crește numărul electronilor ce devin liberi. Din punct de vedere al energiei de activare, deosebirile dintre metale, semiconductori și izolatori se explică astfel: energiile de activare ale izolatorilor sînt foarte mari și practic prin încălzire nu apar purtători; energiile de activare ale semiconductorilor sînt mai mici, astfel încît prin încălzire apar din ce în ce mai mulți purtători; energia de activare pentru metale este nulă, astfel încît la orice temperatură numărul purtătorilor este același.

11.4. **Purtătorii de sarcină în semiconductori.** În semiconductori participă la conducție nu numai electronii de valență care au primit energie egală cu energia de activare și au devenit liberi, ci și electronii de valență care au rămas legați de atomi. Pentru a înțelege modul în care pot participa la conducție electronii legați, să analizăm comportarea electronilor dintr-un cristal de germaniu, cînd acestuia i se aplică un cîmp electric exterior. Atomul de germaniu are 4 electroni de valență. În cristalul de germaniu fiecare atom este înconjurat de alți 4 atomi, astfel că în jurul fiecărui atom sînt 8 electroni de valență. În figura 11.1, *a* este schițat un model în plan al legăturilor covalente dintre atomii de germaniu, iar în figura 11.1, *b* modelul legăturilor reale. Să presupunem că un electron de valență a primit energie egală cu energia de activare și a devenit liber. În locul lui a rămas un loc liber, o legătură chimică nesatisfăcută. Un cîmp electric exterior deplasează electronul liber cu viteza v_e în

* Este vorba de siliciu foarte pur, care conține atomi străini în raport mai mic de unu la un miliard.

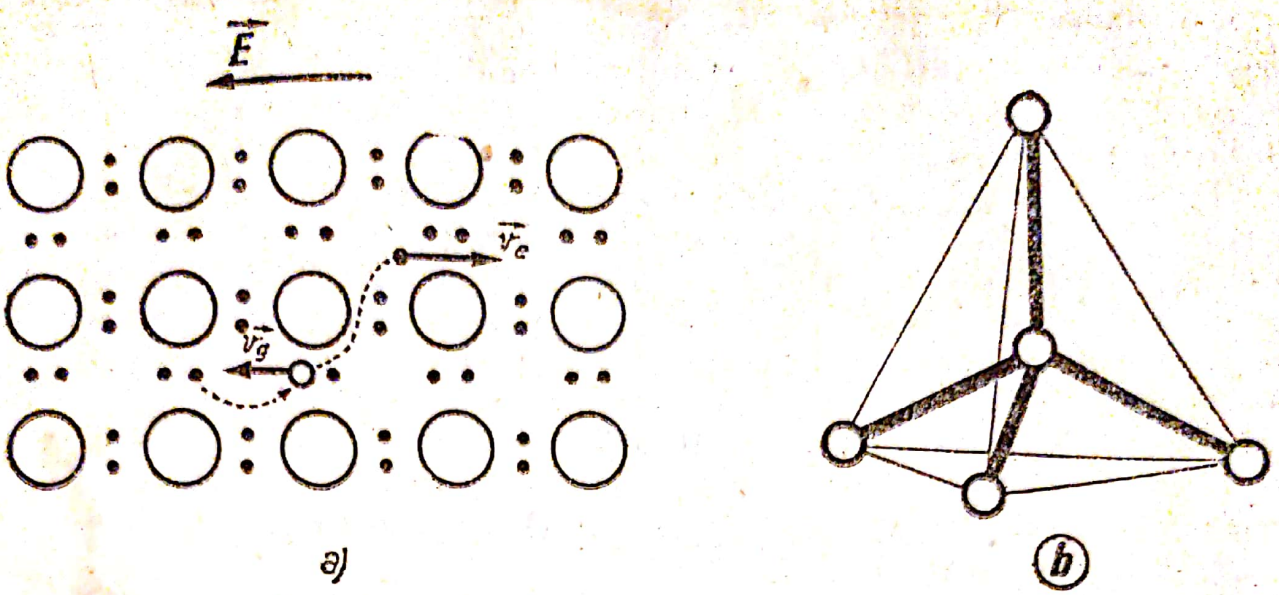


Fig. 11.1

sens contrar cîmpului, dar sub acțiunea aceluiași cîmp se poate deplasa și un electron vecin locului electronic liber, ca să-l ocupe. Apare un alt *loc electronic liber*, ce va fi ocupat de un alt electron legat vecin, deplasat sub acțiunea cîmpului electric ș.a.m.d. Astfel se obține *o deplasare a locului liber în sensul cîmpului*, ca și cum locul liber ar fi o sarcină electrică pozitivă. Așadar și electronii legați pot participa la conducție, cu condiția să existe legături chimice nesatisfăcute. Participarea la conducție a electronilor legați este echivalentă cu cea a unor sarcini pozitive care se deplasează în sensul cîmpului cu viteza v_e. Locurile electronice libere, echivalente din punct de vedere al conducției cu niște sarcini pozitive, se numesc *goluri*.

Așadar în semiconductori participă la conducție două feluri de purtători de sarcină: electronii (negativi) și golurile (pozitive). În semiconductorii puri electronii liberi și golurile apar perechi. Se numesc semiconductori cu *conducție intrinsecă semiconductorii în care există același număr de electroni și de goluri.*

11.5. **Semiconductori cu impurități.** Introducerea unor cantități foarte mici de atomi ai altor elemente în semiconductori poate schimba esențial proprietățile lor electrice. Introducerea de atomi pentavalenți în germaniu duce la apariția unui număr mare de electroni liberi. Elementele din grupa a V-a, de exemplu fosforul, au cinci electroni de valență. Dacă se introduc atomi de fosfor în cristalul de germaniu, numai 4 din acești cinci electroni participă la formarea legăturilor covalente (fig. 11.2, *a*). Al cincilea electron se desprinde ușor de atom, este cedat cristalului. Elementele introduse în semiconductori, care dau electroni liberi, se numesc *impurități donoare*. Apariția electronilor liberi datorită impurităților donoare nu este însoțite de apariția de goluri. Conducția în semiconductorii în care numărul electronilor liberi nu este egal cu al golurilor se numește *conducție extrinsecă*. În cazul în care conducția se face în principal cu electroni (sarcini negative), ea se *numește*

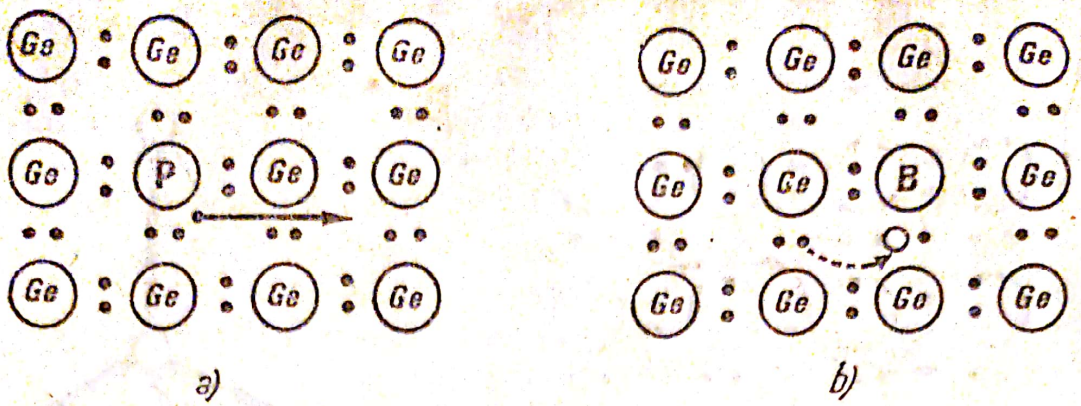


Fig. 11.2

conducție de tip n. În semiconductorii de tip n electronii *sînt purtătorii majoritari*, iar golurile *purtătorii minoritari*.

Elementele din grupa a III-a, de exemplu borul, au numai trei electroni de valență. Introduși în cristalul de Ge, atomii acestor elemente nu pot completa toate legăturile cu atomii vecini. Una dintre legături rămîne necompletată (fig. 11.2, *b*). Atomul poate accepta un electron legat de la un atom vecin, în locul căruia apare un gol. Elementele care produc în semiconductori goluri, prin captarea de electroni legați de la atomii vecini, se numesc *impurități acceptoare*. În semiconductorii cu impurități acceptoare conducția este extrinsecă și se numește *conducție de* tip p, deoarece se face în principal prin goluri pozitive. În acești semiconductori purtătorii majoritari sînt golurile, iar electronii sînt purtătorii minoritari.

Cantități foarte mici de impurități donoare sau acceptoare introduse într-un semiconductor pur duc la creșterea considerabilă a conductibilității. Astfel, introducînd în siliciul pur impurități în raport de un atom la un milion de atomi de Si, numărul de purtători la temperatura camerei devine de aproximativ 100 000 de ori mai mare decît numărul de purtători din siliciul pur, ceea ce duce la o creștere a conductibilității tot de aproximativ 100 000 de ori.

Numărul de purtători în semiconductorii cu conducție extrinsecă este determinat de numărul atomilor de impuritate introduși și nu variază cu temperatura. De aceea rezistența acestor semiconductori mai întîi crește cu creșterea temperaturii, ca la metale, ca urmare a intensificării ciocnirilor purtătorilor cu rețeaua cristalină. Situația se schimbă în domeniul temperaturilor foarte mari, cînd se formează un număr mare de perechi de purtători electron-gol, pe seama energiei termice ridicate. În acest caz numărul de perechi electron-gol poate întrece mult numărul atomilor de impuritate și semiconductorul conține practic același număr de electroni și de goluri. La temperaturi foarte înalte conducția devine deci intrinsecă și rezistența scade cu creșterea temperaturii.

11.6. Termistorul. Proprietatea semiconductorilor cu conducție intrinsecă de a-și varia mult rezistivitatea în funcție de temperatură este folosită pentru construirea unor dispozitive semiconductoare foarte sensibile la variațiile de temperatură,

numite *termistori*. Termistorii sînt confecționați din pulbere de oxizi de semiconductori presată sub formă de bare, discuri sau mici perle și sînt introduși în diverse circuite electrice cu ajutorul a două contacte. Măsurînd cu ajutorul unei punți de rezistență valorile pe care le ia rezistența unui termistor la diferite temperaturi cunoscute, se realizează etalonarea termistorului care poate fi astfel folosit pentru măsurarea unor temperaturi necunoscute. Avantajele unui astfel de termometru sînt: sensibilitatea mare pe un interval relativ larg de temperaturi, dimensiuni reduse, astfel încît poate fi introdus în locuri greu accesibile, posibilitatea de a citi temperatura la distanță de locul de măsurare. Termistorii se pot folosi în dispozitive de reglare a temperaturii. Într-un astfel de dispozitiv variațiile temperaturii în jurul temperaturii dorite provoacă variații ale rezistenței termistorului, care într-un montaj special provoacă închiderea sau deschiderea circuitului de încălzire. În felul acesta temperatura se menține automat în jurul unei valori medii dinainte stabilite.

În unele circuite este supărătoare variația rezistențelor metalelor cu temperatura. Rezistența conductorilor metalici crește cu temperatura. Dacă în serie cu o astfel de rezistență se pune un termistor, a cărui rezistență *scade* cu temperatura, se obține un ansamblu care practic este insensibil la variațiile de temperatură exterioare.

O serie de aplicații ale termistorilor se bazează pe variația rezistenței lor la încălzirea provocată de trecerea unui curent mare prin ele. S-a constatat că tuburile electronice au o durată de funcționare mai mare dacă la aprindere filamentele sînt încălzite încet. O astfel de încălzire se realizează prin conectarea în serie a unui termistor. Inițial el are o rezistență mare și curentul în circuit este mic. Prin efect Joule termistorul se încălzește, rezistența lui scade și curentul în circuit ajunge la valoarea necesară.

B. Dioda semiconductoare

11.7. **Joncțiunea p—n.** Într-un cristal semiconductor, în care o parte conține impurități acceptoare, iar cealaltă parte impurități donoare (fig. 11.3, *a*), se formează o regiune de tranziție între cele două regiuni, numită joncțiune p—n. În joncțiunea p—n se obține o trecere de la conducția de tip p la cea de tip n.

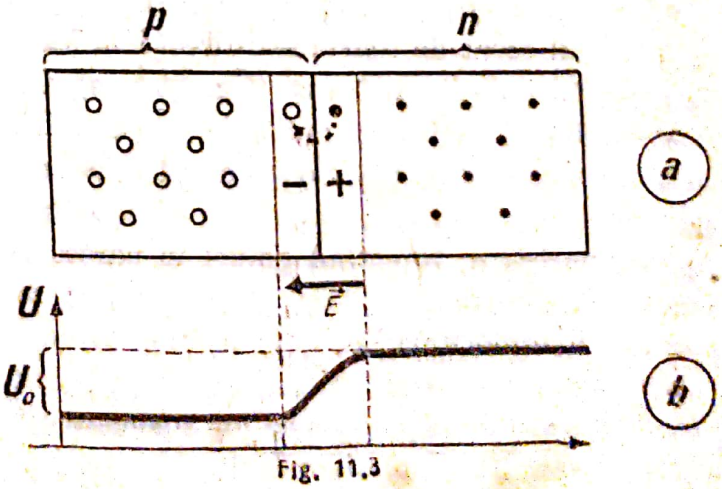


Fig. 11.3

Electronii din partea n difuzează în partea p, unde întîlnesc legături chimice nesatisfăcute, goluri. Electronii ocupă locurile libere întîlnite în partea p. Procesul prin care dintr-un electron liber și un gol se reface o legătură chimică se numește *recombinare*. Recombinarea este însoțită de degajare de ener-

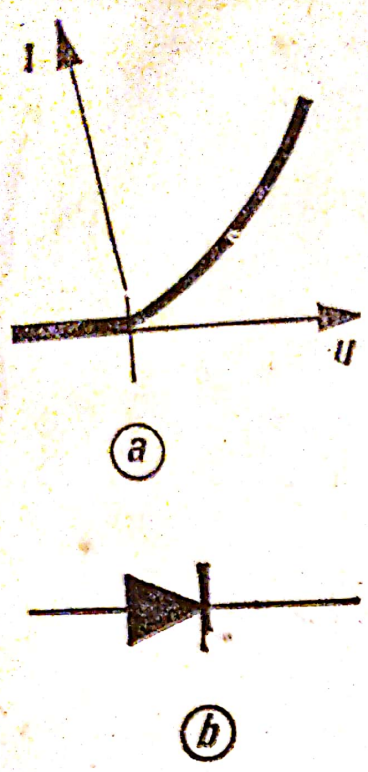


Fig. 11.4

gie. Ca urmare a difuziei electronilor în partea p, partea p, inițial neutră electric, se încarcă negativ, potențialul ei electric scade, iar partea n, inițial neutră electric, rămîne încărcată pozitiv, potențialul ei crește (fig. 11.3, *b*). Între partea n și partea p apare o diferență de potențial de contact U_0, și un cîmp electric îndreptat de la n la p, care se opune deplasării electronilor. Din cauza acestui cîmp numai electronii dintr-o mică regiune de lîngă joncțiune pot să părăsească partea n. Corespunzător, numai într-o mică regiune din partea p golurile se recombină cu electronii difuzați. În aceste două regiuni practic nu sînt purtători liberi: din partea n au plecat electronii, iar în partea p golurile s-au recombinat cu electronii difuzați. **Așadar, de o parte și de alta a joncțiunii p—n se formează o porțiune de cristal sărăcită de purtători liberi, numită strat de baraj.** S-a dat denumirea de strat de baraj deoarece acumularea de sarcini de o parte și de alta a joncțiunii p—n creează o diferență de potențial de contact care se opune deplasării electronilor spre partea p și a golurilor spre partea n.

11.8. **Trecerea curentului prin joncțiunea p—n.** Joncțiunea p—n are calități redresoare. Aplicînd o tensiune exterioară continuă pe joncțiune, astfel încît polul pozitiv să fie la partea p și polul negativ la partea n, se constată că prin joncțiune trece curent electric, a cărui intensitate crește cu creșterea tensiunii aplicate. Dacă însă se inversează polaritatea tensiunii exterioare, practic nu trece curent. Caracteristica curent — tensiune se aseamănă cu cea a unei diode (fig. 11.4, *a*). De aceea o joncțiune p—n se mai numește și *diodă semiconductoare*. Reprezentarea convențională a unei astfel de diode este arătată în figura 11.4, *b*. Sensul săgeții indică sensul curentului permis de diodă. Sensul tensiunii exterioare pentru care prin joncțiune trece curent, cu polul pozitiv la partea p și cel negativ la partea n, se numește *sens direct*; sensul pentru care nu trece curent — *sens invers*.

Cîmpul creat de tensiunea directă în stratul de baraj este de sens invers cîmpului stratului de baraj însuși (fig. 11.5, *a*). Cîmpul rezultat din suprapunerea acestor două cîmpuri va fi deci mai mic, electronii din partea n îl pot învinge mai ușor și pot trece spre partea p. Se spune că tensiunea directă *injectează* electroni în partea p. De asemenea tensiunea exterioară directă împinge golurile pozitive dinspre partea p spre partea n, injectînd goluri în partea n. Electronii injectați în partea p sînt acolo purtători minoritari, după cum și golurile injectate în partea n sînt acolo purtători minoritari, prin joncțiune se deplasează purtători de sarcină, deci *trece curent electric*, cu atît mai intens, cu cît tensiunea directă este mai mare. **Așadar, trecerea curentului în joncțiunea p—n pe care este aplicată o tensiune directă se datorește injecției purtătorilor minoritari.**

Scanned with OKEN Scanner

Cînd se aplică pe joncțiune o tensiune exterioară inversă, cu polul negativ la partea p și cel pozitiv la partea n, electronii din partea n sînt atrași de polul pozitiv, iar golurile din partea p sînt atrase de polul negativ (fig. 11.5, *b*). Rezultă o lărgire a stratului de baraj, sărăcit de purtători. Prin stratul de baraj nu trec electroni spre polul pozitiv, deoarece în partea p, de unde ar trebui să vină, nu există electroni liberi. De asemenea prin stratul de baraj nu trec goluri spre polul negativ, deoarece în partea n nu sînt goluri. Așadar, *cînd se aplică o tensiune inversă, dioda semiconductoare este blocată*, prin ca nu circulă curent.

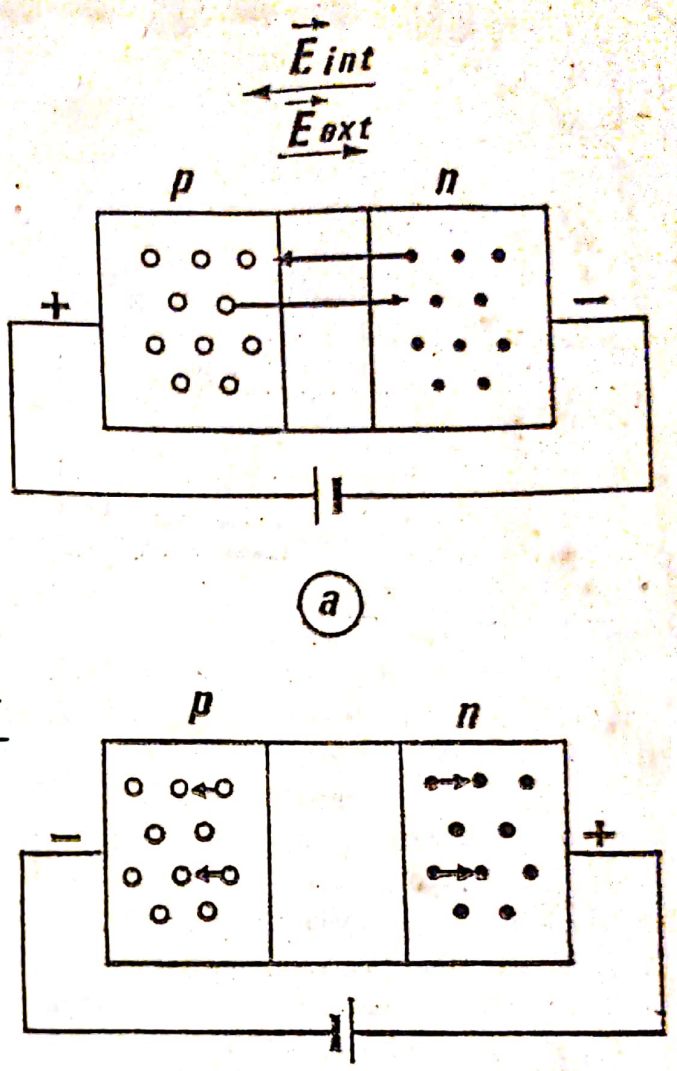


Fig. 11.5

11.9. **Redresarea cu diode semiconductoare.** Diodele semiconductoare se pot întrebuința pentru redresarea curentului alternativ, ca și o diodă cu emisie termoelectronică. Față de aceasta din urmă diodele semiconductoare prezintă o serie de avantaje: nu necesită circuit de încălzire, au un volum mult mai mic și o durată de funcționare mult mai mare. Dezavantajul principal al diodelor semiconductoare este că își pierd calitățile redresoare la temperaturi mari. La temperaturi suficient de ridicate, atît în partea n, cît și în partea p sînt generate termic foarte multe perechi electron-gol, ambele părți căpătînd conducție intrinsecă. Practic nu mai există nici o deosebire între partea p și partea n și dioda se comportă ca un rezistor.

Pentru redresarea curentului alternativ se pot folosi aceleași scheme ca și în cazul diodelor cu emisie termo-electronică. Pentru redresarea ambelor alternanțe se poate folosi și o schemă cu patru diode așezate în punte. Tensiunea alternativă se aplică pe o diagonală a punții, iar tensiunea redresată se culege pe cealaltă diagonală (fig. 11.6). Pentru o alternanță curentul trece printr-o ramură AB, prin diagonala de sarcină BD, apoi prin ramura opusă celei dintîi DC. Reîntoarcerea în punctul A este imposibilă, deoarece potențialul punctului A este mai mare decît al punctului D și dioda este blocată. Pentru cealaltă alternanță curentul circulă

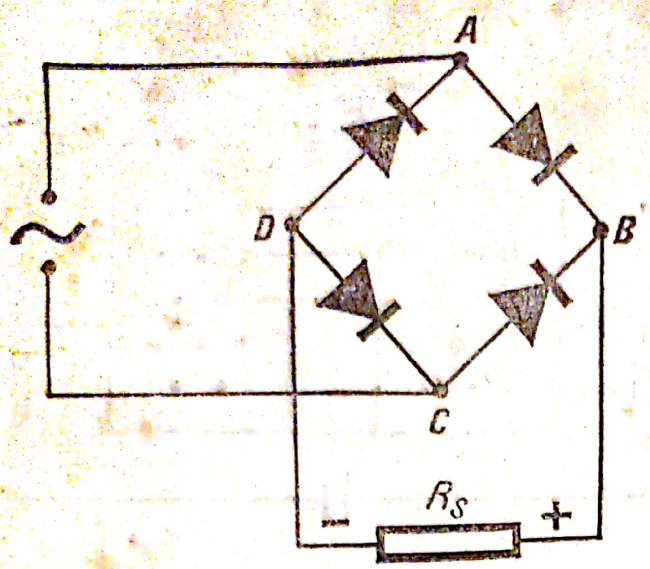


Fig. 11.6

prin celelalte ramuri ale punții și *are același sens prin diagonala de sarcină*, ca și cel dat de prima alternanță.

C. Tranzistorul

11.10. **Funcționarea.** Tranzistorul este un dispozitiv semiconductor care poate înlocui triodele cu emisie termoelectronică. El este alcătuit dintr-un semiconductor cu trei straturi de conducție diferită: un strat n între două straturi p, la tranzistorul numit $p - n - p$ (fig. 11.7, *a*), sau un strat p între două straturi n, la tranzistorul numit $n - p - n$ (fig. 11.7, *b*). Vom studia funcționarea tranzistorului $n - p - n$. Stratul din mijloc al semiconductorului se numește *bază*, straturile laterale se numesc *emitor* și *colector*. Tranzistorul poate fi considerat ca format din două diode semiconductoare: una emitor-bază și cealaltă bază-colector (fig. 11. 8, *a*).*

Pentru funcționarea tranzistorului, *pe dioda bază-colector se aplică o tensiune inversă*, cu polul pozitiv la partea n, adică la colector (fig. 11. 8, *a*). Deoarece în partea p nu sînt electroni liberi care să fie atrași de polul pozitiv de la colector, în circuitul colectorului curentul este practic nul. Dacă în bază se injectează electroni din emitor, prin aplicarea unei *tensiuni directe pe dioda emitor-bază*, electronii

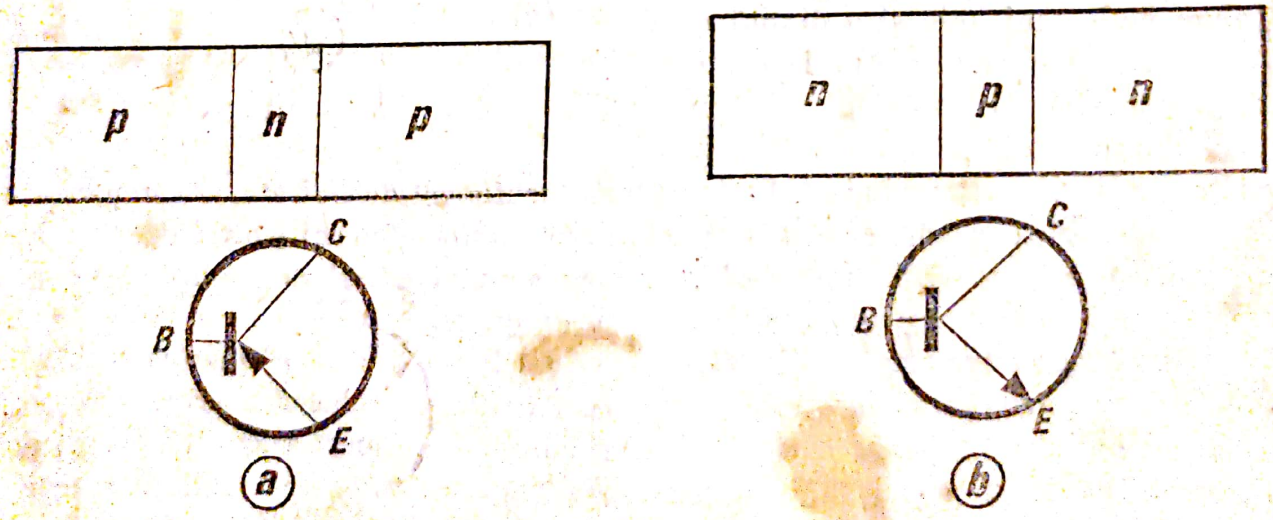


Fig. 11.7

* Săgețile indică electrozii emitorilor, iar sensul lor sensul tensiunii în joncțiunea bază-emitor.

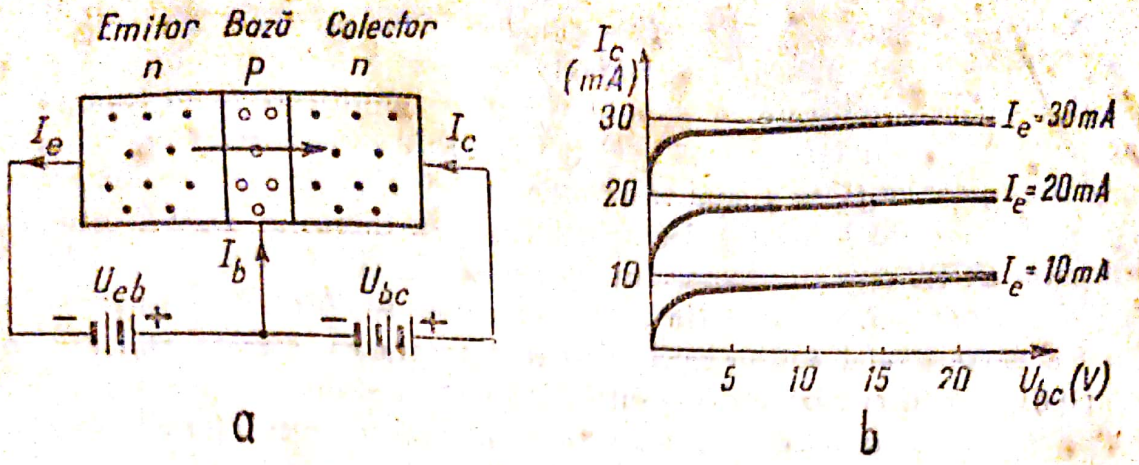


Fig. 11.8

injectați vor fi atrași de colectorul pozitiv și în circuitul colectorului va circula curent. În acest fel **curentul în circuitul colectorului este comandat de curentul din circuitul emitorului, care la rîndul său este determinat de tensiunea aplicată între emitor și bază** U_{eb}.

Peste anumite valori ale tensiunii bază-colector U_{bc} toți electronii injectați în bază sînt colectați de colector, curentul I_c atinge valori de saturație (fig. 11.8, *b*) și curentul I_b care circulă între bază și sursa U_{bc} este foarte mic. În caracteristicile din figura 11.8, *b* se vede că pe măsură ce crește curentul emitorului I_e, crește și curentul colectorului I_c, iar tensiunea bază-colector U_{bc} practic nu influențează curentul colectorului.

Aplicînd între emitor și bază o tensiune alternativă (fig. 11.9), variațiile de tensiune provoacă variații ale curentului emitorului, care produc variații ale curentului colectorului. Pe rezistorul de sarcină R_s, mare, din circuitul colectorului variațiile de curent produc variații de tensiune, mai mari decît ale tensiunii de intrare. Așadar, *tranzistorul poate funcționa ca amplificator de tensiune.*

Pentru ca semnalul amplificat să nu fie deformat, în circuitul emitorului se introduce o tensiune continuă U_o, care are rolul de a stabili *punctul de funcționare* al tranzistorului: tensiunea U_o produce un anumit curent de emitor, în jurul căruia se produc variațiile date de tensiunea alternativă. Dacă se alege punctul de funcționare pentru care $I_E = 0$, dioda emitor-bază permite numai trecerea alternanțelor pozitive, pentru care este polarizată direct și deci tranzistorul funcționează ca detector.

Montajul discutat, din figura 11.9, se numește montaj cu bază comună, deoarece circuitul emitorului și circuitul colectorului au o porțiune comună — baza. Se folosesc și montaje cu emitorul comun.

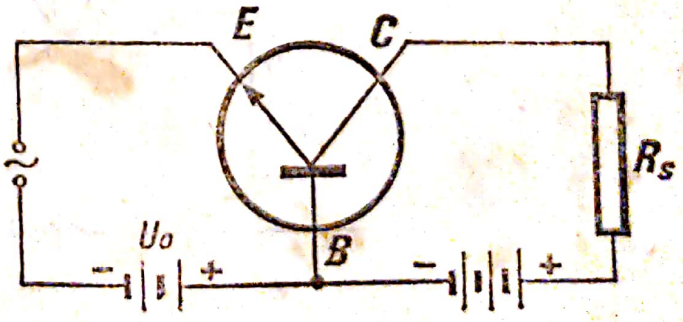


Fig. 11.9

Tranzistorul $p - n - p$ funcționează după un principiu analog cu cel al tranzistorului $n - p - n$, dar tensiunile aplicate trebuie să aibă o polaritate inversă.

11.11. Etaj de amplificare. Schema unui etaj de amplificare cu un tranzistor montat cu emitorul comun este arătată în figura 11.10. În acest montaj funcționarea tranzistorului este analoagă cu a unei triode. Electronii sînt emiși de emitor, controlați de tensiunea aplicată bazei și colectați de colector. Circuitul *EDBE* este al bazei, iar circuitul *ECSE* este al colectorului. Pe dioda bază colector se aplică tensiune inversă de la sursa *S*. O parte din tensiunea sursei se aplică rezistenței de sarcină și o mică parte diodei emitor-bază. Deoarece tensiunea directă aplicată în felul acesta pe dioda emitor-bază nu este suficientă pentru stabilirea punctului de funcționare, pe dioda emitor-bază se aplică o tensiune mai mare cu ajutorul unui divizor de tensiune format din rezistorii Rd_1 și Rd_2. Tensiunea sursei se împarte pe acești doi rezistori și de pe rezistorul Rd_2 se culege tensiunea necesară pentru stabilirea punctului de funcționare.

Intrarea în circuitul emitorului se face între punctul masă și bază cu ajutorul unui condensator C_s care lasă să treacă numai componentele alternative. Ieșirea se face la capetele rezistorului de sarcină. Condensatorul C_s lasă să treacă numai componentele alternative și *de aceea este indiferent dacă ieșirea se face* între punctele *a* și b_1, sau între punctele *a* și *b* care includ și sursa. În al doilea caz însă, se poate face conectarea etajului la intrarea unui etaj de amplificare, analog.

11.12. Importanța practică. Apariția tranzistorilor și a celorlalte dispozitive semiconductoare a adus schimbări importante în radiotehnică. Tranzistorii ocupă un volum mic și se poate realiza miniaturizarea aparaturii. Ei nu necesită alimentare

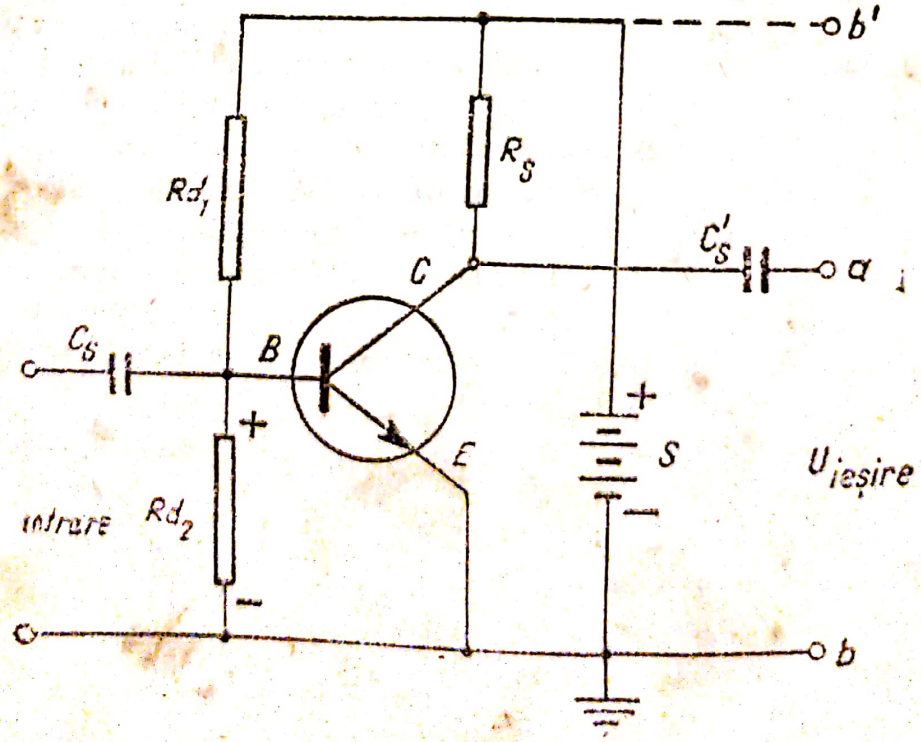


Fig. 11.10

pentru circuite de încălzire, iar tensiunea continuă necesară pentru funcționare este mai redusă decît la tuburi, de aceea au un consum de energie electrică mai redus În același timp tranzistorii au o durată de funcționare mai mare decît tuburile. Aceste avantaje ale tranzistorilor au făcut ca ei să înlocuiască tuburile, în special la aparatura care trebuie să aibă volum și greutate mică. Ei se folosesc din ce în ce mai mult în dispozitivele de automatizare. Mașinile electronice de calcul ar fi gigantice dacă nu s-ar folosi dispozitive semiconductoare.

În țara noastră se fabrică tranzistori și alte dispozitive semiconductoare la întreprinderea de piese radio și semiconductori IPRS — Băneasa.

Întrebări

1. Ce purtători de sarcină participă la conductibilitate în: metale, semiconductori, lichide, gaze și vid?
2. Prin ce se deosebește un gol de un ion pozitiv?
3. Pot exista și alte căi de mărire a numărului de perechi electron-gol în afară de creșterea temperaturii? Cum s-ar putea folosi practic un astfel de fenomen?
4. În ce constă influența temperaturii asupra proprietăților diodelor și tranzistorilor?
5. Un semiconductor conține impurități donoare și un număr mic de impurități acceptoare. În el există și electroni și goluri sau numai electroni?
   Ce se întîmplă cu purtătorii minoritari injectați prin aplicarea unei tensiuni directe?
   După dispariția lor prin recombinare, cum mai trece curentul electric?
6. Diode semiconductoare de un anumit tip pot suporta tensiuni pînă la 40 V. Cum se pot lega mai multe astfel de diode, ca ele să redreseze tensiuni de 100 V?
7. Să se compare un tranzistor cu un tub electronic triodă.
8. Să se explice funcționarea unui tranzistor $p - n - p$.
9. Poate funcționa un tranzistor care are o distanță mare între joncțiunea emitorului și cea a colectorului?

Scanned with OKEN Scanner

12. Oscilaţii şi unde electromagnetice. Aplicaţii

A. Oscilaţii electrice

12.1. **Circuitul oscilant.** Descărcarea unui condensator se poate face aperiodic sau periodic. Descărcarea este aperiodică dacă se face printr-un rezistor şi este periodică dacă se face printr-o bobină. Cu montajele din figura 12.1 se pot realiza experienţe care ilustrează descărcarea condensatorului. În primul montaj (fig. 12.1, *a*) condensatorul este încărcat de la sursa de tensiune continuă, apoi este conectat în circuitul de descărcare, prin aducerea comutatorului în poziţia *2*. Condensatorul se descarcă: prin rezistorul R trece un curent electric, iar voltmetrul V indică scăderea tensiunii către zero, la început brusc şi apoi lent. Descărcarea condensatorului s-a făcut *aperiodic*. Energia înmagazinată de condensator la încărcare se transformă în energie termică prin efect Joule.

În cel de-al doilea montaj (fig. 12.1, *b*) rezistorul este înlocuit cu bobina L. *Repetînd* experienţa, condensatorul se descarcă prin bobina L, iar voltmetrul V indică oscilaţiile acului de o parte şi de alta a poziţei de zero. Se obţine deci o descărcare *periodică, oscilatorie* a condensatorului. Amplitudinea oscilaţiilor scade treptat datorită disipării energiei prin efect Joule pe rezistenţa mică a spirelor bobinei.

Pentru reuşita experienţelor descrise se recomandă să se utilizeze o capacitate, o inductanţă şi o rezistenţă de valori foarte mari, sau să se utilizeze în locul voltmetrului un osciloscop catodic, pe ecranul căruia se vor observa curbele din figura 12.1.

La descărcarea condensatorului printr-o bobină, oscilaţiile tensiunii la bornele condensatorului sînt însoţite de oscilaţii ale curentului prin circuit. Aşadar, într-un

Scanned with OKEN Scanner

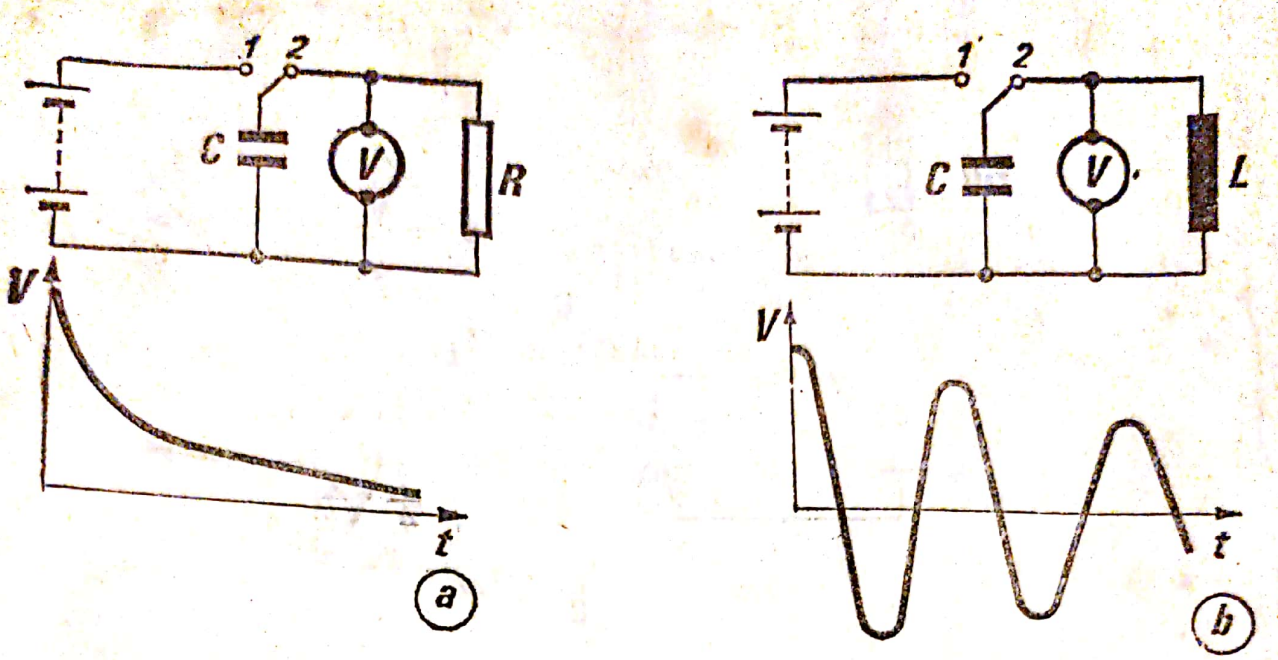


Fig. 12.1

circuit format dintr-un condensator și o bobină se produc **oscilații electrice**. De aceea acest circuit se numește **circuit oscilant**.

12.2. **Producerea oscilațiilor electrice.** La momentul inițial al descărcării $t = 0$ (fig. 12.2, *a*) între armăturile condensatorului tensiunea u are valoarea maximă $u = U_m$, iar energia circuitului este concentrată în cîmpul electric dintre armăturile condensatorului. Electronii concentrați pe armătura negativă a condensatorului încărcat se vor deplasa prin bobină către armătura pozitivă. Ca rezultat, prin bobină circulă un curent i, care crește pe măsură ce tensiunea u scade, atingînd valoarea maximă $i = I_m$ cînd $u = 0$ (graficul din fig. 12.2, *a*) și care este deci defazat în urma tensiunii, datorită fenomenului de autoinducție produs în bobina L. Trecerea de la starea condensatorului încărcat la starea $u = 0$ se produce într-un sfert din perioada de oscilație. Curentul de descărcare i produce în bobina L un cîmp magnetic B care atinge valoarea maximă odată cu curentul.

În momentul $t = \frac{T}{4}$ circuitul se află în starea din figura 12.2, *b*. Cîmpul electric E este zero, în timp ce cîmpul magnetic B este maxim; energia din circuit este concentrată în cîmpul magnetic din bobină. Tensiunea fiind nulă, acțiunea cîmpului electric în acest moment a încetat și curentul începe să scadă (graficul din fig. 12.2, *b*). Scăderea curentului nu se face brusc, deoarece trecerea curentului prin bobină este prelungită după încetarea acțiunii cîmpului electric *datorită fenomenului de autoinducție*. Electronii se deplasează în continuare, în același sens ca și pînă acum și se concentrează pe armătura care anterior a fost pozitivă. *Condensatorul se reîncarcă*, dar în sens contrar celui de la început. Cînd tensiunea de sens invers atinge valoarea maximă $u = U_m$, electronii își încetează deplasarea și curentul în bobină devine zero.

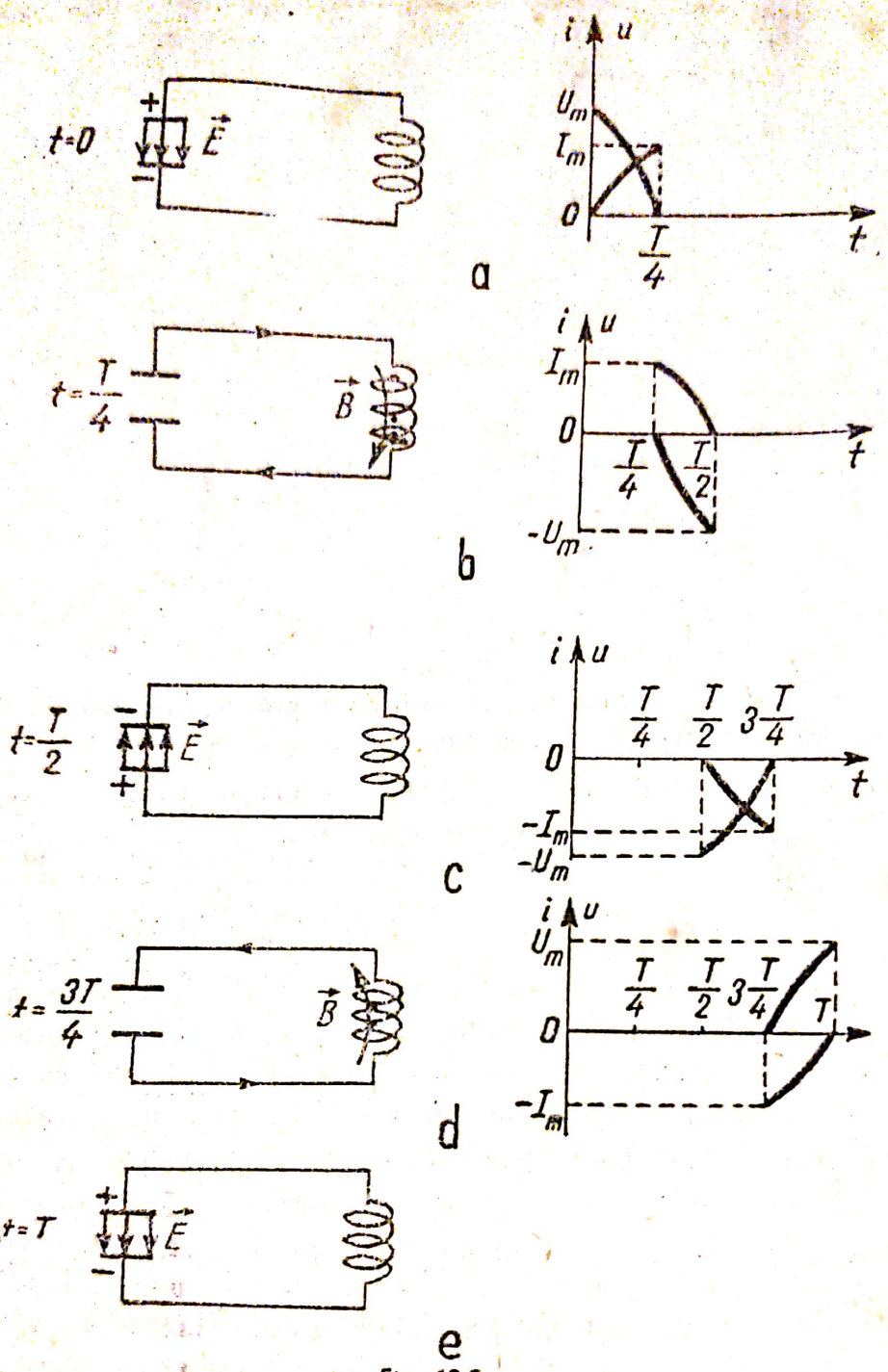


Fig. 12.2

În acest moment circuitul este în starea din figura 12.2, *c*, analoagă stării *a*, dar cu tensiunea de sens invers; s-a terminat o jumătate din perioada de oscilație. Cîmpul electric dintre armăturile condensatorului este maxim, iar cîmpul de inducție magnetică este nul. Energia din circuit este concentrată din nou în cîmpul electric.

Începînd din momentul $t = \frac{T}{2}$, fenomenele se succedă ca mai înainte, dar în sens contrar. Condensatorul se descarcă, trecînd din starea *c* în starea *d*, tensiunea scade, curentul crește (graficul din fig. 12.2, *c*), iar energia cîmpului electric se transformă

Scanned with OKEN Scanner

în energia cîmpului de inducție magnetică. În starea *d* toată energia din *circuit* este concentrată în cîmpul magnetic din bobină.

Urmează apoi reîncărcarea condensatorului de către tensiunea autoindusă în bobină (graficul din figura 12.2, *d*) și se ajunge la situația inițială a condensatorului încărcat (fig. 12.2, *e*), de unde întreaga succesiune de fenomene se repetă. Concentrînd graficele succesive din figura 12.2, *a*, *b*, *c*, *d*, se obține graficul oscilației tensiunii și curentului în cursul descărcării (fig. 12.3). Fenomenele descrise *sînt provocate* în primul și al treilea sfert de perioadă de *descărcarea condensatorului*, iar în al doilea și al patrulea sfert de perioadă *de fenomenul de autoinducție din bobina care reîncarcă condensatorul*.

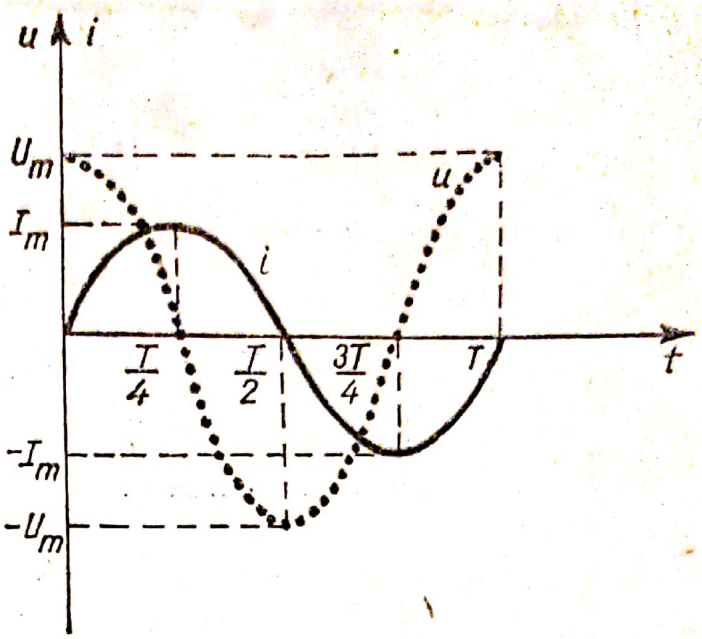


Fig. 12.3

Așadar, în circuitul oscilant se produc oscilații ale cîmpului electric și ale cîmpului de inducție magnetică, strîns legate între ele și care se condiționează reciproc. În timpul oscilațiilor electromagnetice energia cîmpului electric și energia cîmpului magnetic se transformă succesiv una în alta.

Transformarea succesivă a energiei în timpul oscilațiilor electromagnetice este analoagă transformării succesive a energiei potențiale și cinetice în timpul oscilațiilor unui pendul. Un pendul care a primit inițial o energie, pe care o înmagazinează sub formă de energie potențială, oscilează apoi liber, fără intervenții exterioare, energia lui potențială transformîndu-se în energie cinetică și reciproc $E_p \rightleftarrows E_k$. Analog, după alimentarea inițială a circuitului oscilant, se produc liber oscilații electrice.

12.3. Perioada. Oscilațiile electromagnetice dintr-un circuit oscilant sînt *libere*. De aceea ele se produc cu o *perioadă proprie*, care depinde numai de valorile capacității *C* și ale inductanței *L* din circuitul oscilant. Cu cît condensatorul are o capacitate mai mare, descărcarea lui durează mai mult. De asemenea, cu cît inductanța bobinei este mai mare, autoinducția acționează mai puternic și curentul prin bobină este prelungit mai mult. Rezultă că perioada de oscilație este cu atît mai mare, cu cît capacitatea și inductanța din circuitul oscilant au valori mai mari.

Pentru a găsi relațiile dintre perioada de oscilație *T*, capacitatea *C* și inductanța *L* a unui circuit ideal, fără pierderi, se observă că tensiunea la bornele boinei este egală cu tensiunea dintre armăturile condensatorului. Curentul prin bobină și condensator fiind același, rezultă că impedanța bobinei trebuie să fie egală cu impedanța condensatorului:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}, \qquad (1)$$

În circuit se produc numai oscilații a căror pulsație (frecvență unghiulară) îndeplinește relația (1). Pulsația oscilațiilor proprii este deci:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \tag{2}$$

iar perioada proprie de oscilație $T = \frac{2\pi}{\omega}$ va fi:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \tag{3}$$

Formula (3), care dă perioada proprie a oscilațiilor electrice, este numită *formula lui Thomson*.

Așadar, perioada proprie a oscilațiilor electrice produse în circuitul oscilant depinde de valorile capacității și inductanței din circuit și nu depinde de amplitudinea oscilațiilor.

12.4. **Oscilații amortizate și neamortizate.** Oscilațiile a căror amplitudine rămîne constantă în timp se numesc oscilații *neamortizate*. Oscilațiile electromagnetice produse într-un circuit oscilant sînt oscilații *amortizate*, adică amplitudinea lor descrește treptat (fig. 12. 1, *b*). Amortizarea oscilațiilor este rezultatul disipării de energie în circuit. Datorită rezistențelor din circuit, ce nu pot fi evitate total, o parte din energie se transformă în energie termică, ducînd la scăderea treptată a energiei care pendulează în circuit.

Dacă se transmite circuitului în mod periodic energia disipată, se compensează amortizarea și se obțin oscilații neamortizate, întreținute.

12.5. **Oscilații întreținute.** Oscilații întreținute se pot obține într-un circuit oscilant LC conectat în circuitul anodic al unei triode (fig. 12.4, *a*). Bobina L a circuitului oscilant este cuplată inductiv cu grila triodei prin bobina L'. Prin intermediul triodei sursa de tensiune continuă trimite periodic circuitului oscilant energia necesară pentru menținerea oscilațiilor întreținute. Pentru aceasta grila este comandată de tensiunea la bornele bobinei L', cuplată inductiv cu circuitul oscilant. Punctul de funcționare este ales de obicei foarte aproape de punctul de blocare (fig. 12.4, *b*).

În montajul din figura 12.4, *a*, oscilațiile tensiunii din circuitul oscilant LC se suprapun peste căderea de tensiune continuă anodică U_0 (fig. 12.4, *b*). Tensiunea U_{ab} dintre punctele a și b ale circuitului oscilează în jurul valorii U_0 între valorile U_1 și U_2. Presupunem că la un anumit moment $t = 0$, tensiunea U_{ab} are valoarea U_1. În procesul de oscilație din circuitul LC tensiunea U_{ab} scade la valoarea U_0 după $\frac{T}{4}$, iar apoi scade în continuare. În absența întreținerii oscilațiilor, după o jumătate de perioadă amplitudinea oscilațiilor de tensiune ar fi $(U_2' - U_0)$, mai mică decît $(U_2 - U_0)$. Datorită curentului care trece în acest timp prin bobina L', în bobina L' apare o tensiune electromotoare de inducție, care se suprapune peste tensiunea continuă U_{a0}*. Cuplajul este astfel aranjat încît tensiunea de negativare a grilei crește în

* Bobina L' trebuie astfel legată încît tensiunea indusă să aibă variația dorită ca în figura 12.4, *b*. În caz contrar, în montaj nu apar oscilații.

Scanned with OKEN Scanner

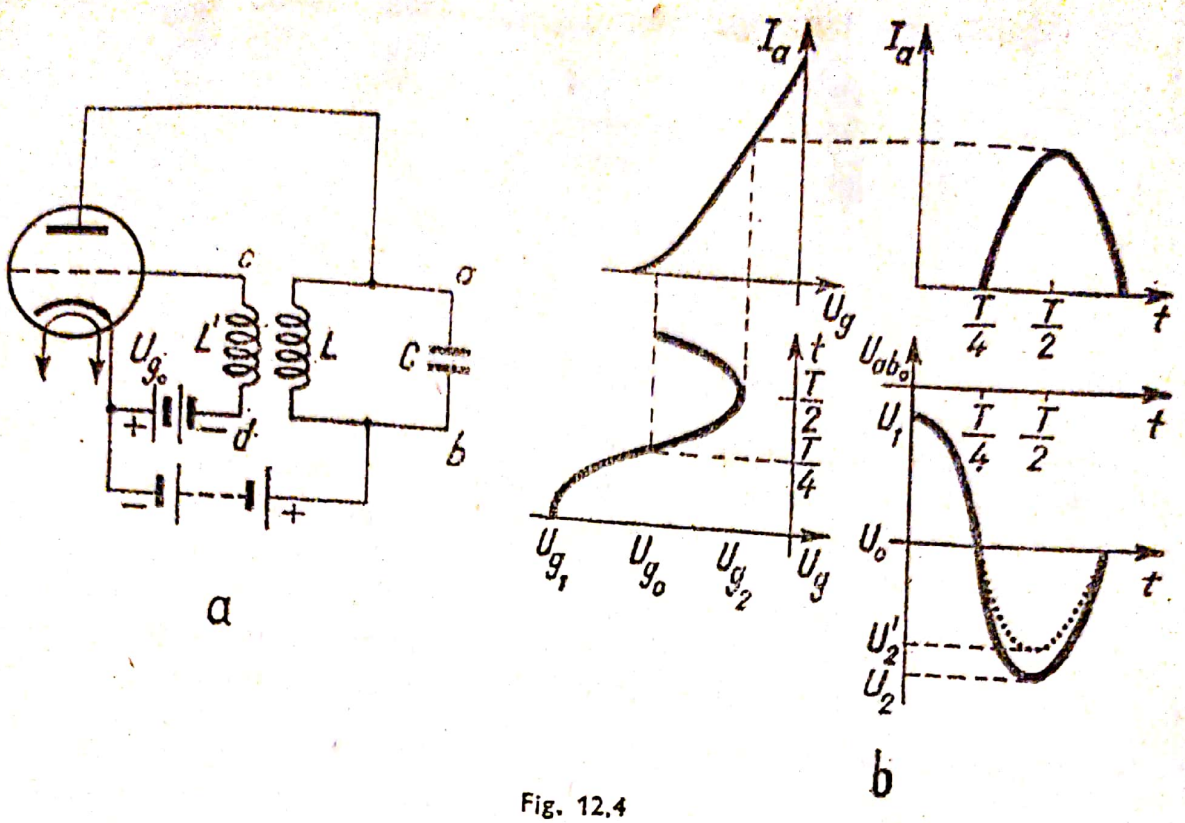


Fig. 12.4

intervalul de timp $\left(0, \frac{T}{2}\right)$, de la valoarea U_{g1} la valoarea U_{g2}. În acest fel, în primul sfert de perioadă trioda se deblochează; prin circuitul anodic circulă curentul anodic I_a, care contribuie la acumularea de electroni pe armătura a, ceea ce corespunde unei scăderi a tensiunii U_{ab}. La momentul $t = \frac{T}{2}$ tensiunea U_{ab} atinge valoarea U_2. Oscilațiile tensiunii în circuitul LC au amplitudine constantă, pierderile de energie fiind compensate în fiecare perioadă, la momentul potrivit, de energia sursei de tensiune anodică.

12.6. **Rezonanța în circuitul oscilant.** Dacă un circuit oscilant este alimentat de la o sursă de tensiune alternativă (fig. 12.5, *a*) de frecvență diferită de frecvența sa

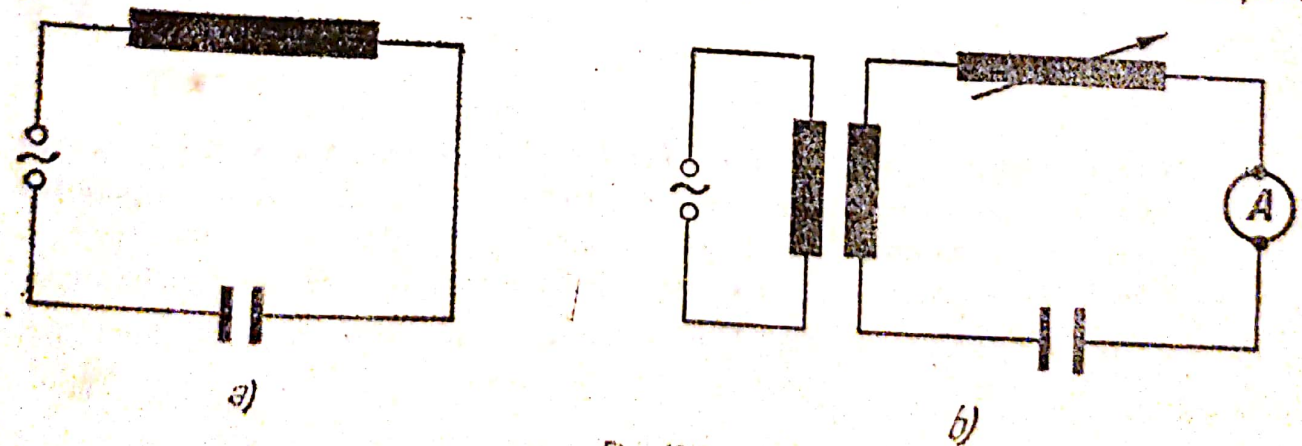


Fig. 12.5

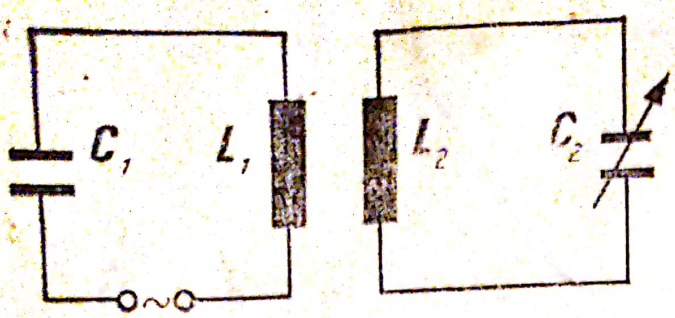


Fig. 12.6

proprie de oscilație, circuitul *oscilează forțat* cu frecvența sursei. Amplitudinea oscilațiilor ce se produc în circuit este mică. Dacă frecvența oscilațiilor date de sursă este egală cu frecvența proprie de oscilație a circuitului oscilant, oscilațiile proprii ale circuitului sînt întreținute de sursă și au o amplitudine foarte mare. În acest caz circuitul oscilant este în *rezonanță* cu sursa exterioară de tensiune.

Pentru ilustrarea fenomenului de rezonanță se poate face următoarea experiență: un transformator coborîtor de tensiune alimentează un circuit oscilant format dintr-un condensator cu capacitate mare și o bobină de inductanță mare, a cărei valoare se reglează prin deplasarea miezului (fig. 12.5, *b*). Transformatorul este alimentat la rețeaua de 50 Hz. Pe ampermetrul A se urmăresc variațiile curentului în circuit, cînd se variază poziția miezului de fier. Se constată că pentru o anumită poziție deviația este maximă, este realizată rezonanța. Pentru această valoare a inductanței, frecvența proprie a circuitului oscilant dată de formula lui Thomson $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ are valoarea de 50 Hz.

Oscilațiile dintr-un circuit oscilant pot intra în rezonanță cu oscilațiile produse în alt circuit oscilant. În figura 12.6 sînt arătate două circuite oscilante la care transferul de energie se face prin cîmpul magnetic comun bobinelor lor, adică este realizat un *cuplaj inductiv*. Circuitul L_1C_1 este alimentat la rezonanță. Cînd perioadele de oscilație ale celor două circuite sînt egale, transferul de energie de la un circuit la altul este maxim. Pentru ca perioadele de oscilație să fie egale, trebuie ca:

$$L_1C_1 = L_2C_2. \tag{4}$$

În practică, condiția de rezonanță (4) se realizează variind capacitatea C_2 a unui condensator variabil.

B. Unde electromagnetice

12.7. Cîmpul electromagnetic. Studiul fenomenelor electromagnetice a arătat că între cîmpul electric și cel magnetic există o strînsă legătură. Astfel, legea inducției electromagnetice arată că un cîmp magnetic variabil în timp înlănțuit de o spiră dă naștere în spiră unei tensiuni electromotoare de inducție. În spira închisă apare un curent electric. Electronii sînt deplasați cu viteza $\vec{v}$ de-a lungul spirei de cîmpul electric $\vec{E}$, ce apare datorită cîmpului magnetic variabil (fig. 12.7, *a*). Apariția cîmpului electric de inducție nu este legată de existența spirei: *el apare ori de cîte ori cîmpul*

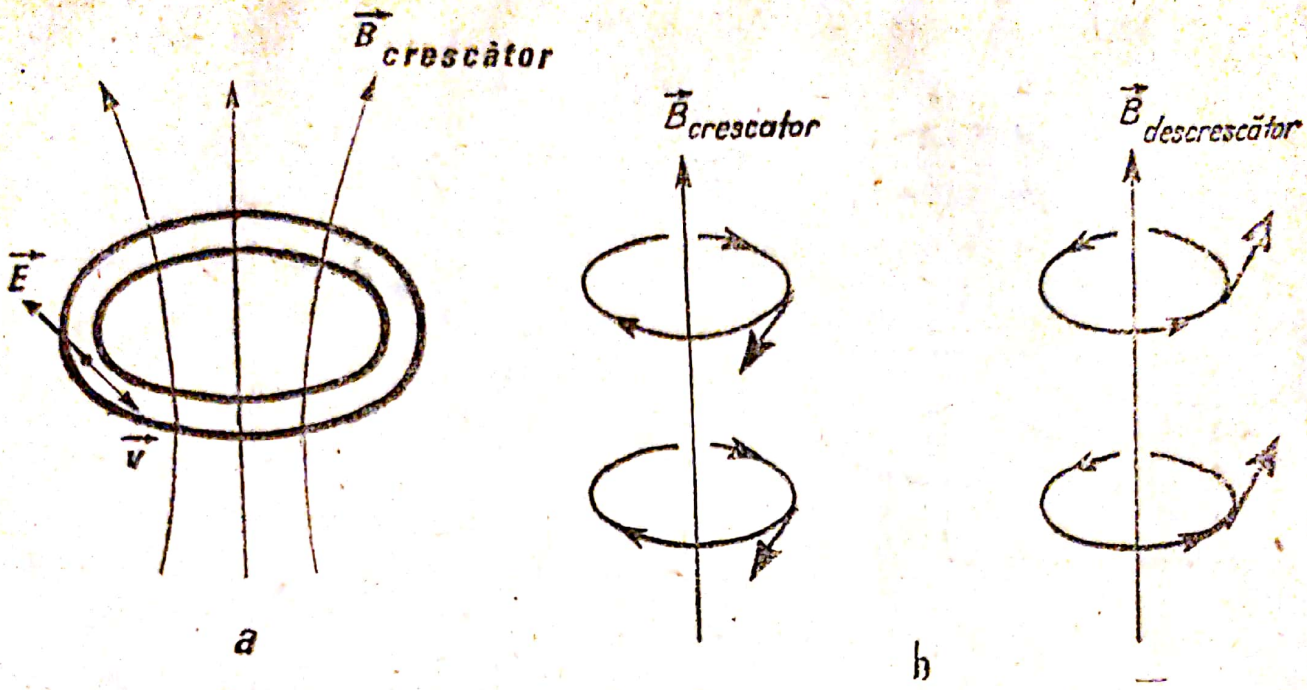


Fig. 12.7

magnetic variază, chiar dacă nu există o spiră în care să se producă curent electric sub acțiunea lui. *Cîmpul electric de inducție are linii de cîmp închise și este perpendicular pe cîmpul magnetic variabil* care-i dă naștere (fig. 12.7, *b*). Dacă B este descrescător, sensul cîmpului electric este dat de regula burghiului drept, iar dacă B este crescător, E are sensul invers celui dat de regula burghiului drept. Din legea inducției electromagnetice rezultă că intensitatea cîmpului electric de inducție este cu atît mai mare, cu cît viteza de variație a cîmpului magnetic este mai rapidă.

Așadar, orice cîmp magnetic variabil se înconjoară cu un cîmp electric cu linii de cîmp închise, a cărui intensitate este cu atît mai mare, cu cît cîmpul magnetic variază mai rapid.

Se pune problema dacă legătura dintre cîmpul magnetic și cel electric este reciprocă și anume dacă un cîmp electric poate genera un cîmp magnetic și în ce condiții. Un curent electric ce trece printr-un conductor generează în jurul conductorului un cîmp magnetic. Dacă circuitul conține un condensator C (fig. 12.8, *a*), el poate fi străbătut de un curent alternativ, care generează un cîmp magnetic. „Închiderea" curentului alternativ prin condensator nu se datorește deplasării de sarcini în interiorul condensatorului, ci acumulării succesive a electronilor cînd pe o armătură, cînd pe cealaltă. Între armăturile condensatorului există un cîmp electric variabil. Înseamnă că porțiunea de circuit dintre plăcile condensatorului nu participă la crearea cîmpului magnetic exterior printr-un curent de conducție, ci prin cîmpul electric variabil dintre armăturile condensatorului. În anul 1865 J.C. Maxwell a emis ipoteza că **orice cîmp electric variabil se înconjoară cu un cîmp magnetic cu linii de cîmp închise, a cărui intensitate este cu atît mai mare, cu cît cîmpul electric variază mai rapid.** Cîmpul magnetic este perpendicular pe cîmpul electric variabil care-i dă naștere, iar sensul său depinde de felul în care variază cîmpul electric: pentru cîmp elec-

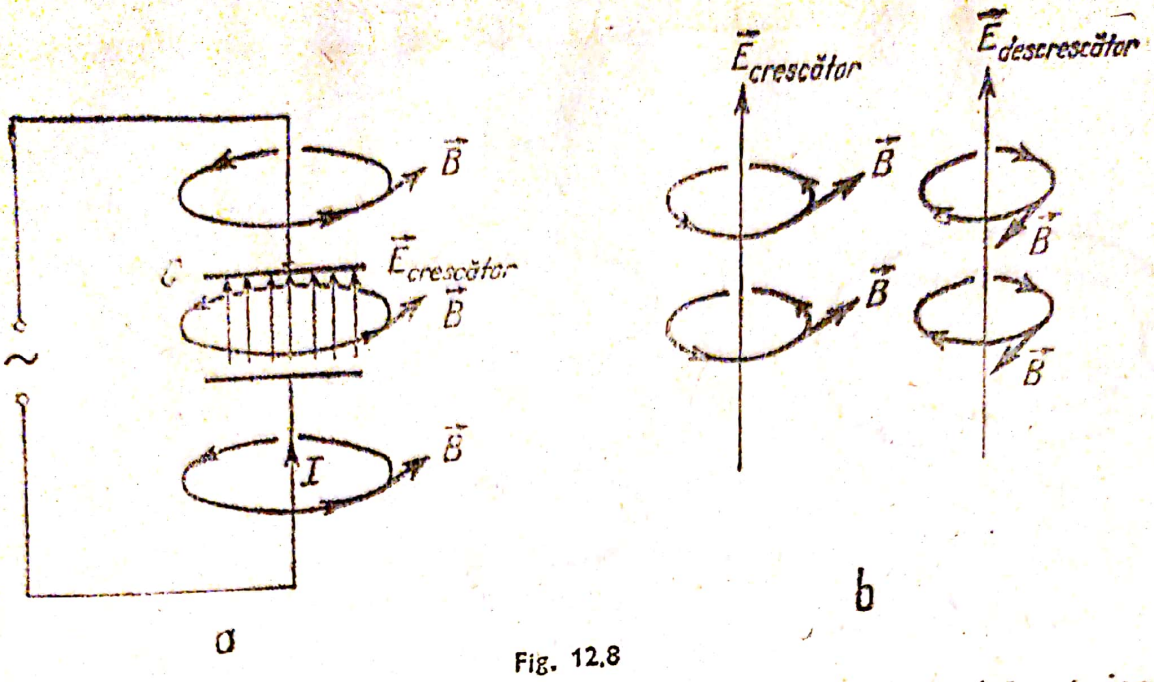


Fig. 12.8

tric crescător, sensul cîmpului magnetic este dat de regula burghiului drept, iar pentru cîmp electric descrescător este invers (fig. 12.8, *b*).

Așadar, între cîmpul electric și cel magnetic există o profundă legătură, care se manifestă prin generarea unuia din ele datorită variației celuilalt. *Ansamblul cîmpurilor electric și magnetic, care oscilează și se generează reciproc, se numește* **cîmp electromagnetic.** Teoria cîmpului electromagnetic a fost elaborată de Maxwell și a fost pe deplin confirmată de experiențe. Una din consecințele importante ale acestei teorii a fost precizarea existenței undelor electromagnetice, descoperite experimental de H. Hertz în anul 1887.

12.8. **Propagarea.** Una dintre proprietățile importante ale cîmpului electromagnetic este capacitatea lui de a se propaga în spațiu. Într-un cîmp electromagnetic ce se propagă, ambele cîmpuri ce-l formează, electric și magnetic, variază periodic în timp. Să examinăm propagarea unui cîmp electric periodic $\vec{E}_1$, cu o variație sinusoidală în timp, care generează în jurul său un cîmp magnetic periodic $\vec{B}_1$ (fig. 12.9).

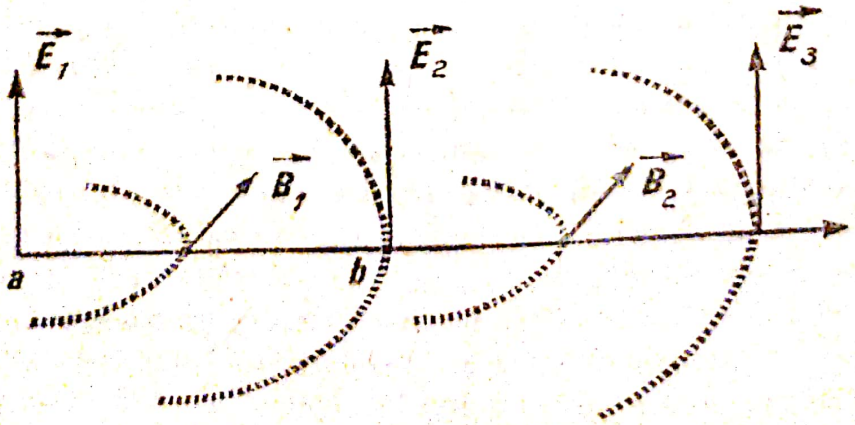


Fig. 12.9

Cîmpul magnetic $\vec{B}_1$, fiind variabil, va genera în jurul său un cîmp electric $\vec{E}_2$. Prin intermediul cîmpului magnetic $\vec{B}_1$ cîmpul electric s-a propagat deci din punctul a în punctul b. Cîmpul electric $\vec{E}_2$ din punctul b este și el variabil și deci va genera în jurul său un cîmp magnetic $\vec{B}_2$ variabil, care va genera un alt cîmp electric variabil $\vec{E}_3$ ș.a.m.d. Rezultă deci o propagare din aproape în aproape a ansamblului de cîmpuri variabile, electric și magnetic.

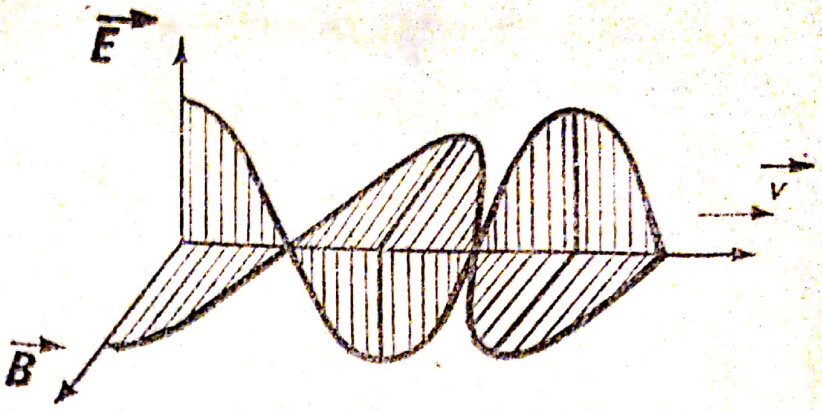


Fig. 12.10

Forma de propagare a cîmpului electromagnetic care variază periodic se numește **undă electromagnetică.** Într-o undă electromagnetică vectorul cîmp electric $\vec{E}$ și vectorul cîmp magnetic $\vec{B}$ oscilează în plane perpendiculare între ele și perpendiculare pe viteza de propagare a undei $\vec{v}$ (fig. 12.10). Vectorii $\vec{E}$, $\vec{B}$ și $\vec{v}$ formează un triedru drept. Cîmpul electric și cîmpul magnetic oscilează în fază, ele trec simultan prin valorile maxime și minime.

Viteza c a undelor electromagnetice în vid a fost găsită teoretic de Maxwell:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, \tag{5}$$

unde ε_0 este permitivitatea vidului, iar μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului. Din formula (5) se poate obține valoarea vitezei undelor electromagnetice în vid:

$$c = \frac{1}{\sqrt{8{,}8 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}. \tag{6}$$

Această valoare coincide cu cea a vitezei luminii în vid. Într-un mediu oarecare, cu constante ε și μ (și constante relative ε_r și μ_r), viteza de propagare a undelor electromagnetice este mai mică decît în vid și are expresia:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}. \tag{7}$$

12.9. **Producerea undelor electromagnetice.** Pentru obținerea undelor electromagnetice trebuie folosit un oscilator electromagnetic, așa cum pentru obținerea undelor acustice este necesar un vibrator. Un astfel de oscilator, capabil să producă unde electromagnetice, este *circuitul oscilant deschis*. Circuitul oscilant deschis se obține prin îndepărtarea una de alta a armăturilor condensatorului dintr-un circuit oscilant închis (fig. 12.11, *b*). Cel mai simplu circuit oscilant deschis este un fir conductor liniar, străbătut de un curent de înaltă frecvență; acesta se numește dipol electric

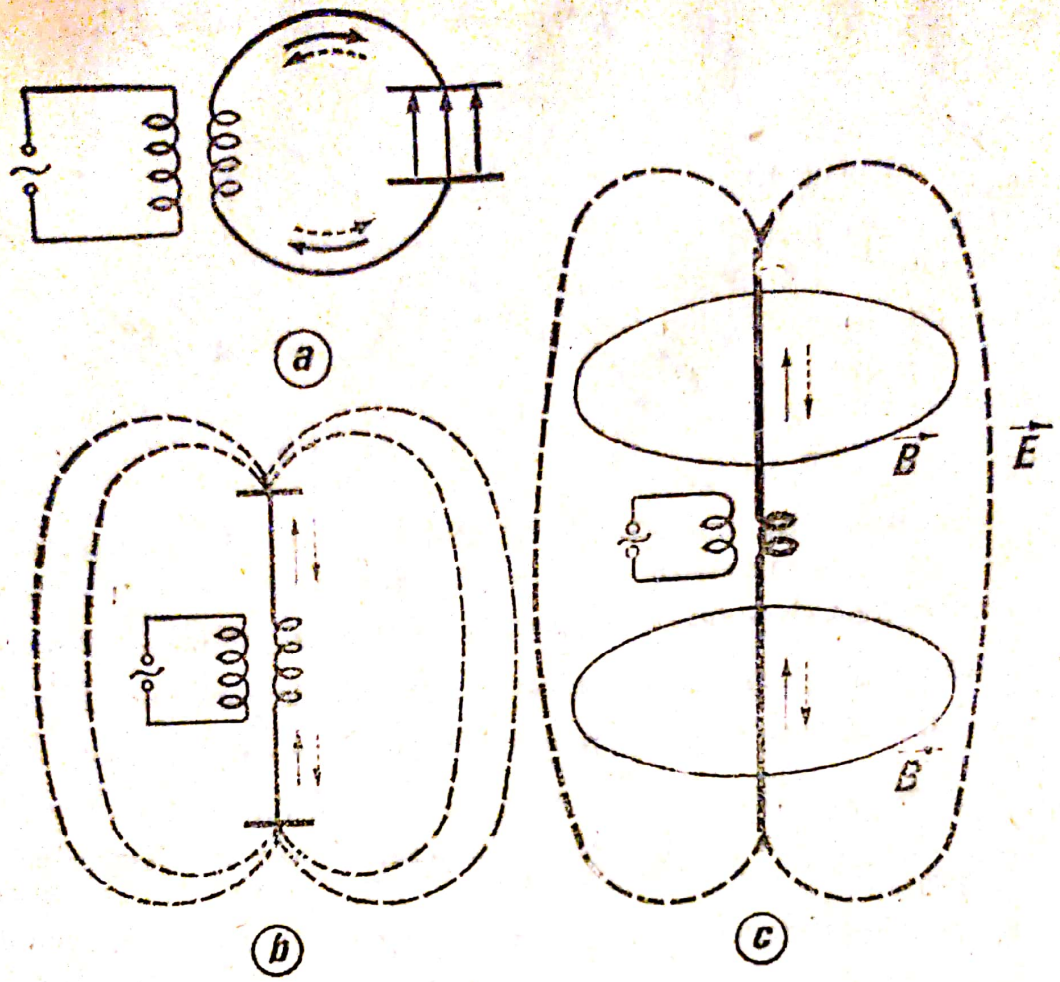


Fig. 12.11

(fig. 12.11, *c*). Capacitatea și inductanța acestui circuit *sînt distribuite de-a lungul întregului fir*. Oscilațiile curentului în dipol sînt induse prin intermediul unei bobine intercalate la mijlocul dipolului.

În circuitul oscilant închis (fig. 12.11, *a*) cîmpul electric are valori mari în spațiul îngust dintre armăturile condensatorului, iar cîmpul magnetic, în interiorul bobinei. Cîmpul magnetic ce ar putea fi creat la distanțe mari în spațiul din jurul conductorilor de legătură este îndreptat în sensuri opuse pentru porțiuni opuse ale circuitului corespunzător sensului curentului în circuit (reprezentat în figura 12.11 prin săgeți continue în prima jumătate de perioadă și săgeți punctate în cea de-a doua). Cîmpul magnetic rezultant în exteriorul circuitului este neglijabil. Circuitul oscilant închis nu radiază practic unde electromagnetice în spațiul înconjurător.

La dipolul electric (fig. 12.11, *c*) cîmpul electric nu mai este concentrat într-un spațiu îngust, ci ocupă o regiune mare în jurul dipolului. Cîmpul magnetic produs de diferite porțiuni ale cîmpului nu se mai anulează, deoarece are același sens pentru orice porțiuni de circuit. Așadar, **în spațiul din jurul dipolului electric există cîmp electromagnetic, care oscilează periodic, cu frecvența curentului din dipol.**

Scanned with OKEN Scanner

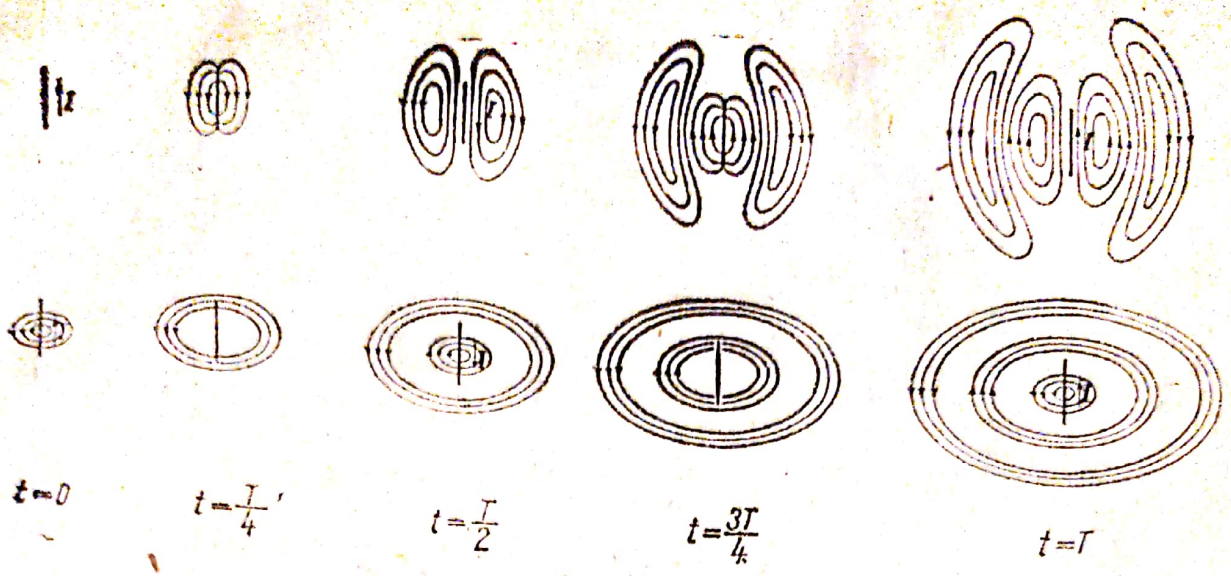


Fig. 12.12

Peste cîmpul electric produs de sarcinile acumulate pe dipol se suprapune cîmpul electric produs de variația în timp a cîmpului magnetic produs de dipol. Din suprapunerea acestor două cîmpuri rezultă un cîmp electric cu linii de cîmp închise (momentul $t = \frac{T}{2}$, fig. 12.12). După o jumătate de perioadă acest proces se repetă dar sensul cîmpurilor se inversează (momentul $t = T$) (fig. 12.12). Cîmpul electric cu linii de cîmp închise nu mai este legat de dipol. Oscilațiile acestui cîmp, în interdependență cu oscilațiile cîmpului magnetic, se propagă în spațiu după mecanismul cunoscut (12.8). *Dipolul electric radiază în spațiu unde electromagnetice, care transportă energie.*

La aceeași intensitate a curentului din dipol, energia radiată de dipol prin unde electromagnetice este cu atît mai mare, cu cît frecvența de oscilație este mai mare. Explicația constă în faptul că intensitatea cîmpului electric (magnetic) generat prin variațiile cîmpului magnetic (electric) — deci energia transportată de unde electromagnetice — este cu atît mai mare, cu cît variațiile respective sînt mai rapide.

12.10. **Antena.** Antena este un circuit oscilant deschis, folosit pentru a radia în spațiu, sau pentru a recepționa unde electromagnetice de o anumită frecvență. Pentru ca energia undelor electromagnetice să aibă valori mari este necesar ca oscilațiile electromagnetice produse în antenă să fie maxime. Aceasta se realizează cînd frecvența proprie de oscilație a antenei este egală cu frecvența oscilațiilor cu care este excitată. Antena este deci un circuit oscilant deschis în care inductanța și capacitatea sînt repartizate uniform de-a lungul firului, ce are o *frecvență proprie de oscilație*. Cea mai simplă antenă constă dintr-un fir conductor vertical, legat cu unul din capete la pămînt (fig. 12.13, *a*). Oscilațiile electromagnetice proprii ale antenei se comportă analog oscilațiilor mecanice ale unei coloane de aer dintr-un tub închis la un capăt și deschis la celălalt, adică sînt unde staționare. La capătul P al antenei legat la pămînt se formează un nod pentru potențial, deoarece potențialul pămîntului este nul și un ventru de curent, deoarece electronii se pot scurge din (sau în) pămînt. La cap-

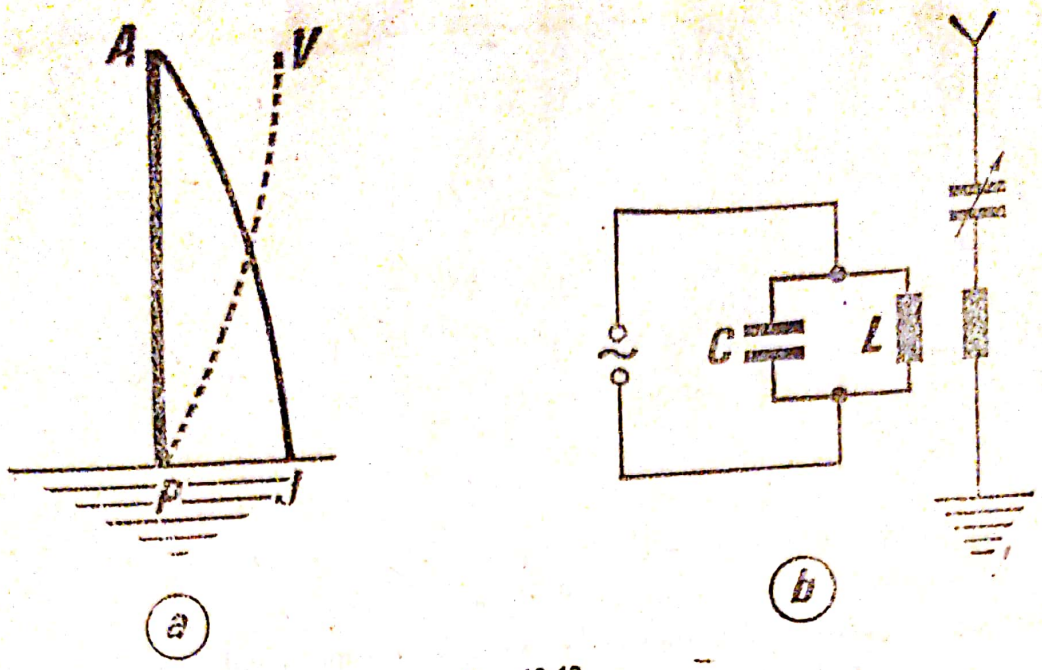


Fig. 12.13

tul A se formează un nod pentru curent $I = 0$ la orice moment, deoarece electronii nu mai au unde să se scurgă și un ventru de potențial (potențialul punctului A este negativ sau pozitiv, după cum se acumulează sau pleacă electronii). Repartiția potențialului de-a lungul antenei este reprezentată de curba punctată VP, iar a curentului de curba AJ (fig. 12.13, *a*). Lungimea l a antenei este egală cu un sfert din lungimea de undă a radiației electromagnetice radiate de ea:

$$l = \frac{\lambda}{4}. \tag{8}$$

Frecvența proprie de oscilație a antenei va fi:

$$\upsilon = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4l}.$$

Oscilațiile electromagnetice din antena radiantă sînt alimentate de un circuit oscilant LC, cuplat inductiv cu antena (fig. 12.13, *b*). Condiția de rezonanță se îndeplinește prin alegerea potrivită a lungimii antenei. În cazul lungimilor de undă prea mari, ar fi incomodă folosirea unei antene exagerat de lungă și atunci se introduce în circuitul antenei o bobină, care are același efect ca și mărirea lungimii antenei. Un condensator introdus în circuitul antenei are același efect ca și micșorarea lungimii antenei. De obicei se introduce în circuitul antenei un condensator variabil (fig. 12.13, *b*) pentru a acorda antena pe frecvența dorită.

12.11. **Proprietățile undelor electromagnetice.** Undele electromagnetice au fost puse în evidență pe cale experimentală pentru prima dată de H. Hertz (1883). Undele electromagnetice folosite în radiocomunicații au primit numele de unde herțiene. După lungimea lor de undă sau după frecvența lor, undele herțiene au fost împărțite în mai multe grupe, ca în tabelul următor:

Lungimea de undă λ	Frecvența	Denumirea după λ
30 km la 2 km	10 — 150 kHz	unde foarte lungi
2 km la 750 m	150 — 400 kHz	unde lungi
750 m la 200 m	400 — 1 500 kHz	unde medii
200 m la 50 m	1 500 — 6 000 kHz	unde intermediare
50 m la 10 m	6 — 30 MHz	unde scurte
10 m la 1 m	30 — 300 MHz	unde ultrascurte (metrice)
1 m la 10 cm	300 — 3 000 MHz	unde decimetrice
10 cm la 1 cm	3 000 — 30 000 MHz	unde centimetrice
1 cm la aprox. 0,1 mm	peste 30 000 MHz	microunde

Undele electromagnetice pot fi și de alte frecvențe decît cele din tabel.

În propagarea lor, *undele electromagnetice se pot reflecta*. Ele sînt reflectate mai ales de suprafața metalelor, a Pămîntului, de apa oceanelor etc. Undele scurte sînt reflectate de ionosferă. Pentru undele scurte și foarte scurte, folosite în televiziune și în radar se construiesc reflectoare metalice cu dimensiuni de ordinul lungimilor de undă. Ele concentrează undele electromagnetice într-o anumită direcție.

Undele lungi și medii pot ocoli obstacole foarte mari și chiar munți. Undele scurte și ultrascurte se propagă practic rectiliniu. De aceea, pentru televiziune sînt necesare posturi de retransmisie.

C. Radioemisie

12.12. **Radiocomunicația.** Prin radiocomunicații se înțelege transmiterea și recepționarea la distanță a unor informații (sunet, imagine etc.) prin intermediul undelor electromagnetice. Pentru realizarea radiocomunicației sînt necesare, pe de o parte instalații de emitere a undelor electromagnetice, numite *radioemițătoare*, iar pe de altă parte instalații pentru recepționarea semnalelor electromagnetice, numite *radioreceptoare*. Fiecare radioemițător emite unde electromagnetice de o anumită frecvență. Pentru a recepționa semnalele unui anumit emițător, receptorul trebuie acordat pentru aceeași frecvență.

Radioemițătoarele pot lucra pe o gamă de unde foarte variabilă, de la undele lungi (kilometrice) pînă la undele centimetrice. Pentru radiodifuziune se folosesc undele lungi, medii și scurte, iar pentru televiziune undele metrice (ultrascurte).

12.13. **Cel mai simplu emițător.** Un emițător radio trebuie să producă oscilații de radiofrecvență, să le moduleze conform informației de transmis și să le transforme în unde electromagnetice, pe care să le radieze în spațiu. Producerea oscilațiilor de radiofrecvență se realizează într-un generator de oscilații întreținute care folosește **trioda. Pentru transformarea oscilațiilor electromagnetice în unde electromagnetice**

Scanned with OKEN Scanner

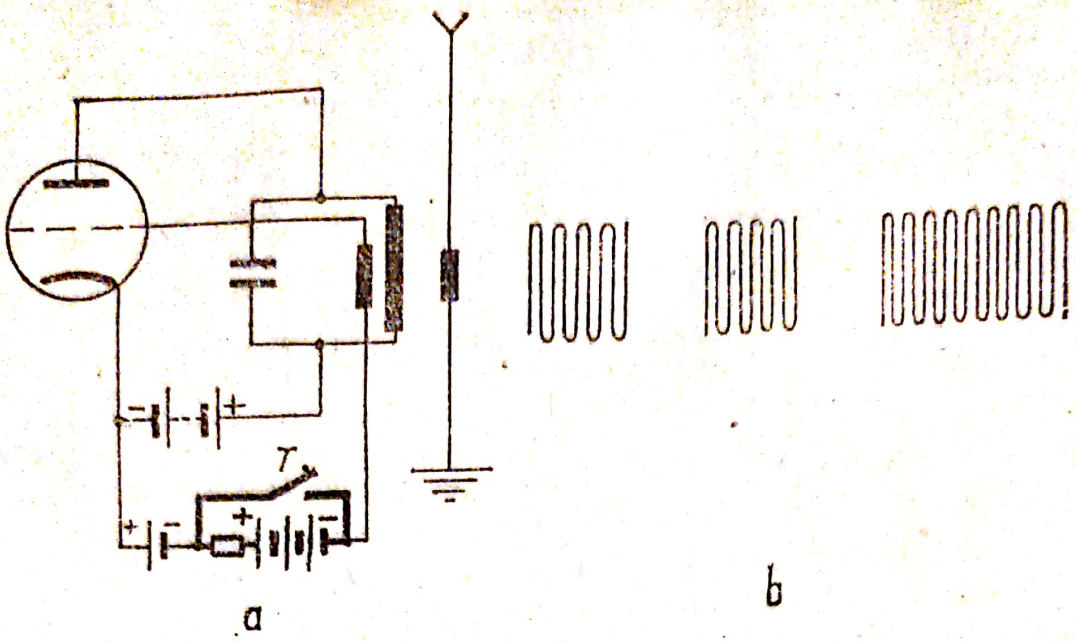


Fig. 12.14

se folosește o antenă cuplată inductiv cu circuitul oscilant (fig. 12.14, *a*). Frecvența proprie a antenei trebuie să fie egală cu frecvența circuitului oscilant.

Cele mai simple semnale transmise de un emițător sînt cele folosite în telegrafia fără fir. Semnalele telegrafice constau dintr-o succesiune de trenuri de unde cu amplitudine constantă, dar de lungimi diferite (fig. 12.14, *b*). Trenurile de unde scurte corespund punctelor, iar cele lungi corespund liniilor. Pentru emiterea unui astfel de semnal, în circuitul de grilă al triodei din generatorul de oscilații întreținute se introduce o baterie de negativare suplimentară, ale cărei borne pot fi șuntate cu manipulatorul telegrafic (fig. 12.14, *a*). Cînd manipulatorul este deschis, bateria de negativare suplimentară produce o negativare mare a grilei, care blochează tubul. Emițătorul nu emite semnal. Cînd se apasă pe manipulator, tensiunea de negativare suplimentară nu se mai aplică grilei, trioda se deblochează și generatorul produce oscilații. Emițătorul emite unde în ritmul apăsării manipulatorului.

12.14. **Modulația.** Semnalele folosite în radiocomunicații sînt, în general, mai complexe decît cele telegrafice. Astfel de semnale sînt de exemplu sunetele ce trebuie transmise în radiodifuziune. Un sunet simplu reprezintă o oscilație sinusoidală, de frecvență mai joasă decît a undelor herțiene folosite în radiocomunicații. Domeniul frecvențelor oscilațiilor sonore se numește domeniu de audiofrecvență sau de joasă frecvență. Frecvențele undelor purtătoare ale semnalului se numesc înalte frecvențe. Pentru a putea transmite un semnal de audiofrecvență (fig. 12.15, *a*) prin intermediul unei unde purtătoare de înaltă frecvență (fig. 12.15, *b*), trebuie realizată *modulația* undei, adică amplitudinea undei purtătoare să fie variată în funcție de oscilația de audiofrecvență (fig. 12.15, *c*). În timpul alternanței pozitive de audiofrecvență, amplitudinea undei modulate este mai mare decît a celei nemodulate, iar în timpul alter-

nanței negative este mai mică. În receptor se realizează *demodulația*, adică trecerea de la unda modulată de înaltă frecvență la oscilații de audiofrecvență.

Un montaj simplu cu care se poate realiza modulația (fig. 12.16, *a*) este asemănător cu cel folosit pentru emiterea semnalelor telegrafice. Negativarea suplimentară a grilei este în acest caz variabilă și se realizează cu ajutorul unui transformator, al cărui primar este în circuitul microfonului M, iar secundarul în circuitul de grilă. Oscilațiile sonore sînt transformate în circuitul microfonului în oscilații electrice de audiofrecvență. În secundarul transformatorului se induc oscilații ale tensiunii de negativare suplimentară U_n (fig. 12.16, *b*). Ca rezultat, amplitudinea curentului anodic oscilează în jurul amplitudinii obținute în lipsa tensiunii de negativare suplimentară (fig. 12.16, *b*). Oscilațiile întreținute din circuitul oscilant, deci și oscilațiile curentului din antenă își variază amplitudinea ca și curentul anodic. În acest fel se obține modulația undelor purtătoare de înaltă frecvență în ritmul oscilațiilor de audiofrecvență. În montajul descris se realizează *modulația în amplitudine*. Există și montaje care realizează *modulația în frecvență*.

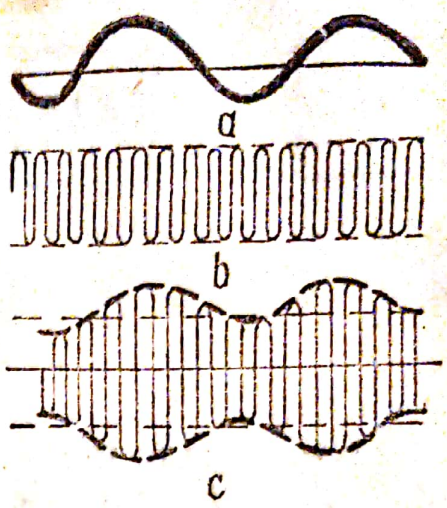


Fig. 12.15

12.15. **Schema bloc a radioemițătorului.** Emițătoarele întîlnite în practică sînt mai complexe decît cel descris. Schema bloc tipică a unui astfel de emițător este ară-

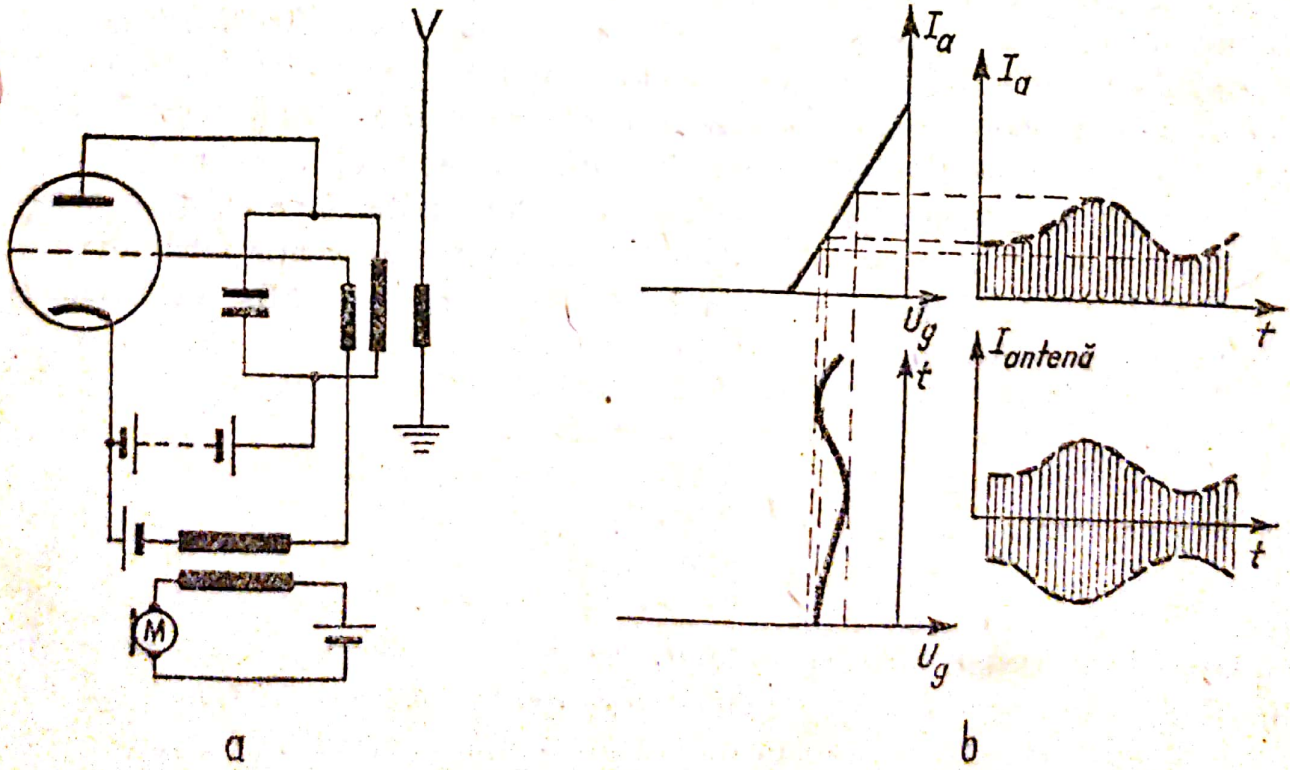


Fig. 12.16

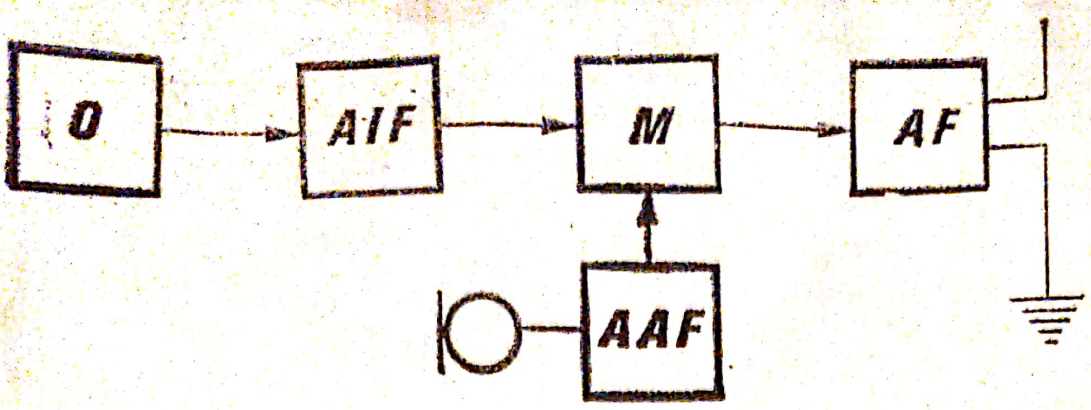


Fig. 12.17

tată în figura 12.17. El se compune dintr-un generator de oscilații întreținute O, dintr-un etaj de amplificare pentru înaltă frecvență AIF, dintr-un etaj de amplificare pentru audiofrecvența AAF, dintr-un etaj de modulație M în care se realizează modularea oscilațiilor de înaltă frecvență, și dintr-un amplificator final AF, cu ajutorul căruia se obține un curent mare în antenă. Numărul etajelor de amplificare poate fi și mai mare. Tuburile folosite în etajele finale ale emițătoarelor de putere disipează energii termice de zeci de kW și de aceea anozii lor sînt răciți cu apă.

12.16. **Banda de frecvențe a undelor modulate.** Experiența și teoria arată că o undă modulată în amplitudine se descompune în trei unde simple sinusoidale, de frecvențe diferite. Dacă se notează cu f_0 frecvența undei nemodulate și cu F frecvența semnalului de audiofrecvență, cele trei unde componente au frecvențele: f_0, $f_0 - F$ și $f_0 + F$. Frecvența maximă a sunetului percepută de ureche este de 16 kHz. Unda modulată cu această frecvență se poate descompune în unde cu frecvențele f_0, $f_0 -$ -16 kHz și $f_0 + 16$ k Hz. Intervalul de 32 kHz dintre $f_0 - 16$ kHz și $f_0 + 16$ k Hz reprezintă banda de frecvențe a undelor modulate, necesară pentru a transmite fidel orice sunet. Pentru ca diferitele radioemițătoare să nu se stînjenească reciproc, trebuie ca benzile lor de frecvențe să nu se suprapună. Necesitatea de a exista un număr mare de posturi radioemițătoare a determinat ca, printr-o convenție internațională, să se adopte banda de frecvențe a unui emițător de numai 9 kHz, excluzîndu-se astfel sunetele de frecvențe foarte înalte.

D. Radiorecepție

12.17. **Funcționarea radioreceptorului.** Semnalele electromagnetice sînt recepționate de aparate speciale, numite **radioreceptoare.** Radioreceptorul transformă semnalul de înaltă frecvență în semnale de audiofrecvență, pe care le aplică unui difuzor sau unei căști telefonice.

Scanned with OKEN Scanner

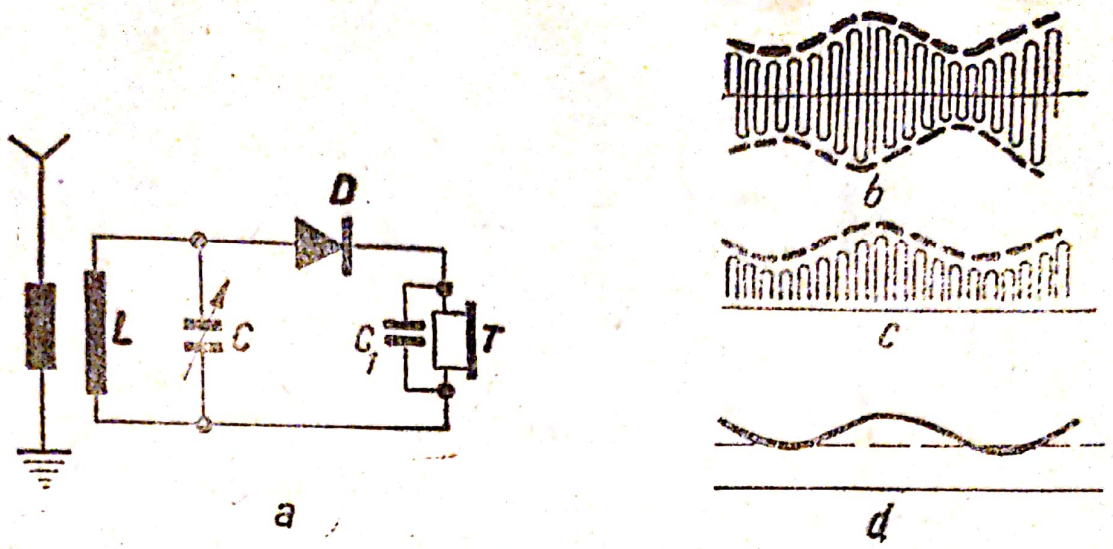


Fig. 12.18

Funcționarea celui mai simplu radioreceptor se poate urmări pe figura 12.18, *a*. Undele electromagnetice sînt captate de antenă. Oscilațiile produse în antenă sînt transmise prin cuplaj inductiv în circuitul oscilant de acord *LC* al receptorului. Cu ajutorul condensatorului variabil, circuitul de acord este adus la rezonanță cu postul emițător dorit. Oscilațiile din circuitul oscilant *LC* (fig. 12.18, *a*) sînt transmise circuitului format din dioda *D* și casca telefonică *T*. Dioda are rolul de a detecta (redresarea oscilațiilor de radio frecvență) oscilațiile, lăsînd să treacă numai alternanțele pozitive (fig. 12.18, *c*). Condensatorul C_1, montat în paralel cu casca telefonică, are rolul de a netezi variațiile de tensiune la bornele căștii (fig. 12.18, *d*): el se încarcă la trecerea alternanțelor pozitive, descărcîndu-se foarte lent în pauza dintre ele. Cu ajutorul diodei și al condensatorului C_1 se realizează așadar demodularea semnalului de înaltă frecvență. Semnalul demodulat conține o componentă de audiofrecvență, care produce vibrații sonore în casca telefonică, precum și o componentă continuă, desenată punctat în figura 12.18, *d*, dar care nu produce vibrații. Componenta continuă apare din medierea alternanțelor de înaltă frecvență, care după redresare sînt toate pozitive. Dacă medierea semnalelor de înaltă frecvență s-ar face înainte de redresare ar rezulta un semnal nul.

Semnalele recepționate cu un astfel de receptor simplu sînt de foarte mică putere, de aceea în cască se pot auzi numai posturile emițătoare apropiate.

12.18. **Folosirea triodei și a tranzistorilor.** Pentru a putea recepționa posturi emițătoare, depărtate, radioreceptorul trebuie să aibă sensibilitate: semnalele foarte slabe recepționate în antenă (de milionimi sau miliardimi de watt) trebuie să fie amplificate, pentru a putea acționa casca telefonică sau difuzorul. În scopul măririi sensibilității, în radioreceptoare se folosesc triode sau tranzistori pentru amplificarea semnalelor. În figura 12.19 sînt arătate două scheme simple de radioreceptoare, cu tub electronic triodă (fig. 12.19, *a*) și cu tranzistor (fig. 12.19, *b*). Trioda și respectiv tranzistorul îndeplinesc pe lîngă funcția de detecție și funcția de amplificare a oscilațiilor din circuitul oscilant de acord. După detecție, semnalul, de data aceasta amplificat,

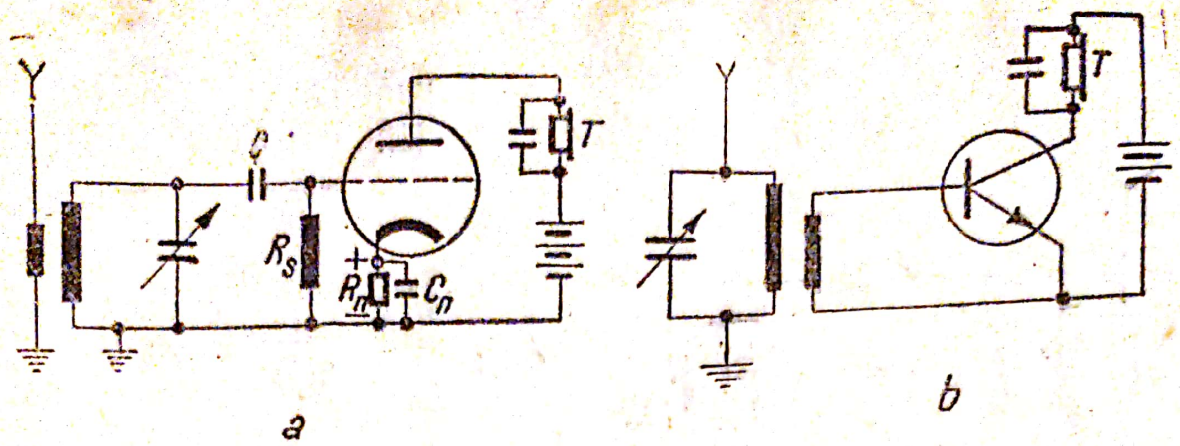


Fig. 12.19

acționează casca telefonică T. În schema din figura 12.19, *a* negativarea grilei se face automat, prin căderea de tensiune pe rezistorul de negativare R_n, ce apare datorită componentei continue a curentului anodic; componenta alternativă a curentului anodic se scurge prin condensatorul de negativare C_n. Grila este adusă la potențialul pămîntului, negativ față de catod, prin intermediul rezistorului de scurgere R_s.

Pentru a mări și mai mult sensibilitatea radioreceptorului se folosesc mai multe etaje de amplificare, atît în audiofrecvențe *AAF*, cît și în înaltă frecvență *AIF* (fig. 12.20). Între etajele de *AIF* și cele de *AAF* se găsește un etaj detecție *D*. Acest tip de receptor se numește cu amplificare directă.

Pe lîngă sensibilitate, radioreceptorul trebuie să aibă și **selectivitate**: din mulțimea undelor electromagnetice emise de diferite emițătoare, pe diferite frecvențe, el trebuie să aleagă numai banda de frecvență corespunzătoare emisiunii dorite. Receptoarele cu un singur circuit oscilant de acord au o selectivitate redusă. Pentru mărirea selectivității se introduc mai multe circuite oscilante de acord, care se reglează simultan. În figura 12.21 sînt arătate două astfel de circuite, introduse unul la intrarea și altul la ieșirea amplificatorului de înaltă frecvență.

12.19. **(Receptorul superheterodină).** Receptoarele moderne, numite superheterodine, au o construcție diferită de a celor cu amplificare directă, ceea ce le asigură o mai bună sensibilitate și selectivitate. Schema bloc a unui receptor superheterodină este arătată în figura 12.22. El conține un amplificator de înaltă frecvență *AIF*, un generator de oscilații local *O* cu frecvență diferită de înalta frecvență recepționată, un etaj amestecător de frecvențe *AF*, un amplificator de frecvență intermediară *AFI*, un detector *D* și un amplificator de audiofrecvență *AAF*.

Generatorul de oscilații *O* produce oscilații de frecvență f_0 care se suprapun în amestecătorul de frecvențe peste oscilațiile de înaltă frecvență f_s recepționate. Din suprapunerea celor două feluri de oscilații rezultă fenomenul de bătăi: frecvența oscilației rezultate f_i, numită *frecvență intermediară*, este egală cu diferența frecvențelor componentelor $f_i = f_0 - f_s$. Oscilațiile de frecvență intermediară sînt modulate ca și oscilațiile de înaltă frecvență recepționate. Acordarea receptorului cu un anumit post de emisie se realizează cu aju-

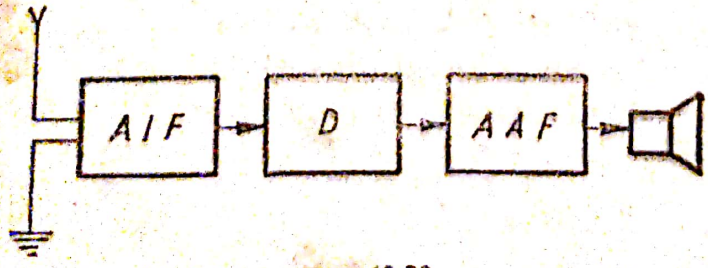


Fig. 12.20

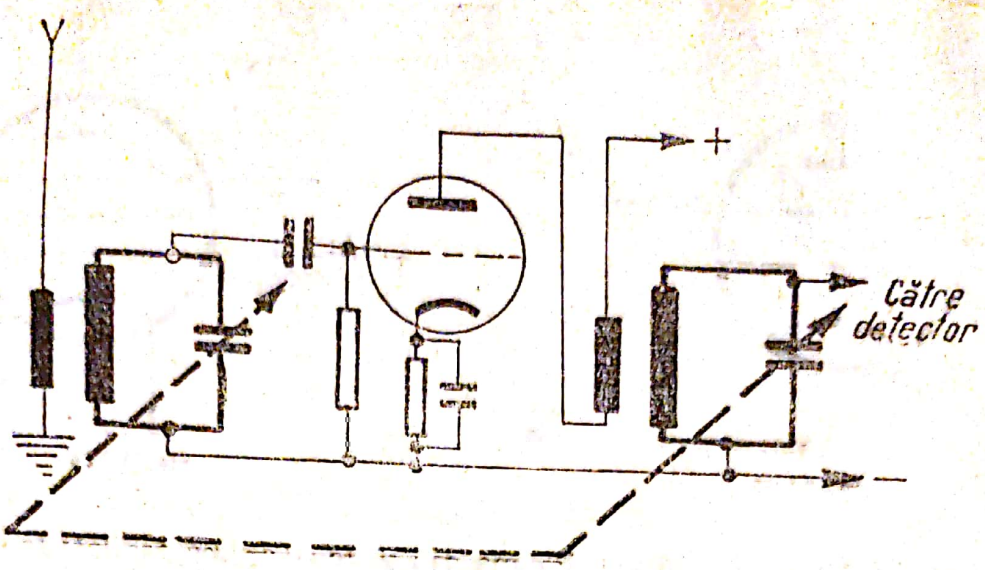


Fig. 12.21

torul condensatorului variabil C_1 de la intrarea etajului *AIF*. Simultan cu condensatorul C_1 se reglează și condensatorul C_2, care modifică frecvența oscilatorului local, în așa fel încît frecvența intermediară să fie constantă, indiferent pe ce post de emisie este acordat receptorul. Oscilațiile de frecvență intermediară sînt apoi amplificate și detectate. Etajele de amplificare de frecvență intermediară sînt cuplate prin circuite oscilante acordate pentru frecvență intermediară. Numărul mare de circuite oscilante acordate mărește mult selectivitatea receptorului. În plus, față de un receptor cu amplificare directă cu mai multe etaje de amplificare, care are un număr mare de circuite oscilante care trebuie mereu reacordate, la receptorul superheterodină acordul circuitelor oscilante nu trebuie schimbat pentru diferite posturi emițătoare, deoarece frecvența intermediară este aceeași. De asemenea receptorul superheterodină are și sensibilitate mare, deoarece etajele de amplificare de frecvență intermediară dau amplificare mare.

12.20. Tuburi electronice cu mai mulți electrozi. Amestecul de frecvențe necesar la superheterodină se poate realiza în principiu într-un tub electronic care conține

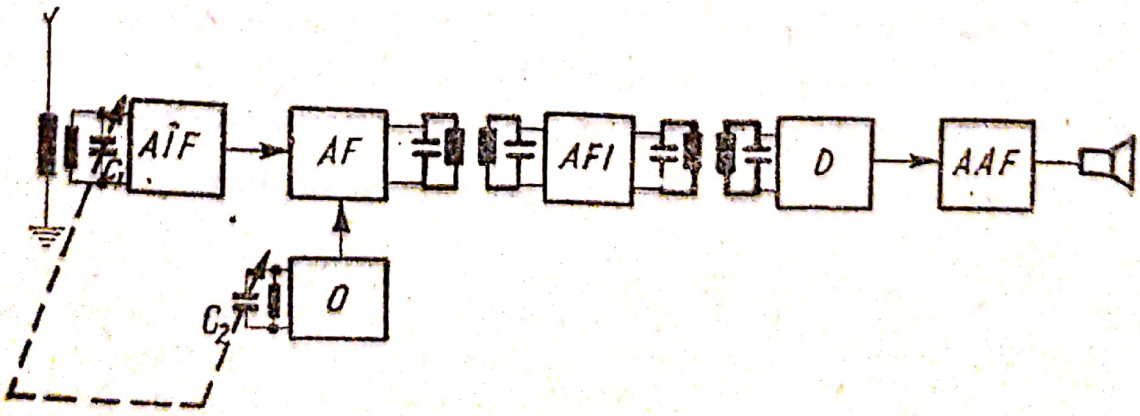


Fig. 12.22

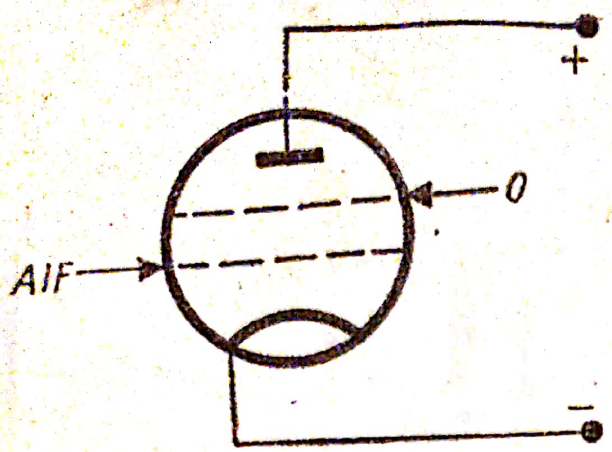


Fig. 12,23

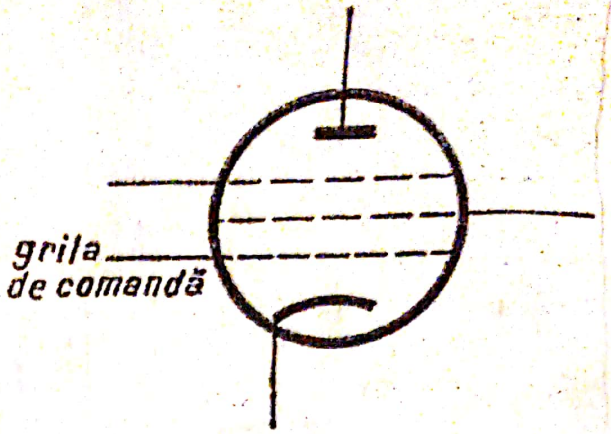


Fig. 12,24

două grile de comandă (fig. 12.23). Pe una din grile se aplică oscilațiile de la *AIF*, iar pe cealaltă oscilațiile de la generatorul de oscilații local *O*. Tuburile folosite în practică pentru amestecul de frecvențe au patru sau cinci grile, dintre care două sînt grile de comandă. Aceste tuburi se numesc hexode și heptode, deoarece au șase, respectiv șapte electrozi.

În mod curent, la radioreceptoare se folosesc pentru amplificare tuburi electronice cu cinci electrozi numite pentode (fig. 12.24). O pentodă conține trei grile, dintre care una de comandă. Coeficientul de amplificare al pentodelor este mult mai mare decît al triodelor, ceea ce face ca ele să fie folosite pe scară largă.

E. Radiolocație

12.21. **Principiul.** Radiolocația (radarul) este determinarea poziției unui obiect în spațiu cu ajutorul undelor electromagnetice reflectate. În principiu, un radiolocator constă dintr-un emițător care trimite în spațiu un fascicul de unde electromagnetice și dintr-un receptor, care recepționează undele reflectate de obstacolele întîlnite. Cunoscînd viteza de propagare a undelor electromagnetice, se măsoară timpul t necesar ca undele să ajungă de la emițător la obstacol și înapoi și se poate calcula distanța dintre radiolocator și obstacol: $d = c\frac{t}{2}$. Emițătorul radiolocatorului emite în impulsuri, adică trenuri de unde (separate prin pauze). În timpul pauzelor de emisie, antena radiolocatorului se cuplează cu receptorul și recepționează undele reflectate. Intervalul de timp foarte scurt dintre emiterea unui tren de unde și recepționarea lui după reflexie se măsoară cu ajutorul unui osciloscop catodic. Baleiajul pe orizontală se face cu aceeași frecvență ca și emiterea de impulsuri. Spotul luminos de pe ecran începe să se deplaseze în momentul emiterii trenului de unde. În același moment, pe plăcile de deflexie verticală se aplică un impuls de tensiune, care face ca

în stînga ecranului să apară un mic dinte (fig. 12.25). În momentul recepționării undelor reflectate, pe plăcile verticale se aplică un nou impuls și pe ecran apare un nou dinte. Cunoscînd timpul necesar spotului luminos pentru a parcurge întregul ecran, se poate calcula timpul necesar pentru parcurgerea distanței dintre cei doi dinți, adică timpul scurs între emiterea și recepționarea semnalului. Pentru rapiditatea determinării distanțelor, se calculează, în prealabil, distanțele corespunzătoare diferitelor intervale de timp și pe ecran se aplică o scară gradată direct în kilometri.

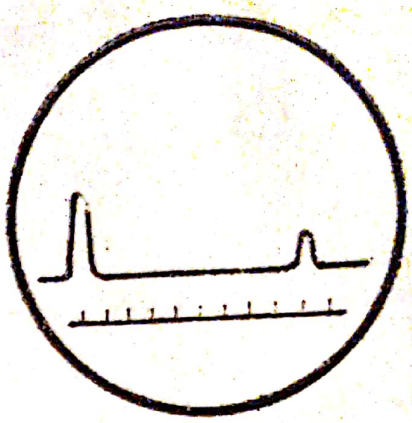


Fig. 12.25

Pentru a putea indica direcția pe care se află obstacolul, undele electromagnetice trebuie să fie emise sub forma unor fascicule cît mai înguste, analog cu fasciculele luminoase trimise de reflectoare. De aceea, antena radiolocatorului se așază în focarul unei oglinzi metalice concave, care reflectă undele într-o singură direcție. Dimensiunile oglinzii trebuie să fie mult mai mari decît lungimea de undă. În radiolocație se folosesc unde electromagnetice decimetrice și centimetrice, care prezintă avantajul că pot fi dirijate și sînt reflectate bine și de obiecte mici. Oglinzile focalizatoare au diametre de ordinul metrului. Pentru reperarea obstacolelor în spațiul din jurul radiolocatorului, antena împreună cu oglinda radiolocatorului se rotesc în jurul unui ax vertical.

12.22. **Aplicațiile radiolocației.** Radiolocația s-a dezvoltat inițial în scopuri militare, pentru detectarea avioanelor și vaselor. Ea a găsit însă și numeroase aplicații pașnice. Navigația aeriană și maritimă a devenit mult mai sigură prin folosirea radiolocatoarelor. Avioanele sau vapoarele au la bord instalații de radiolocație, cu ajutorul cărora se orientează pe timp de vizibilitate redusă (noapte, ceață, nori etc.). Aeroporturile sînt de asemenea prevăzute cu radiolocatoare, pentru a putea dirija decolarea și aterizarea avioanelor în condiții de proastă vizibilitate. Un alt domeniu în care radiolocația și-a găsit importante aplicații este *meteorologia*. Cu ajutorul radiolocatoarelor se poate determina poziția norilor, ceea ce dă posibilitatea prevederii ploilor, a furtunilor etc.

F. Mașini electronice de calcul

12.23. **Sistemul de notație binar.** Mașinile electronice de calcul au fost construite din necesitatea de a efectua un mare număr de calcule într-un timp cît mai scurt. Calcule a căror efectuare ar necesita unui om săptămîni și luni de lucru sînt rezolvate de un calculator electronic în cîteva minute. Deoarece operează cu numere, aceste

mașini se numesc *numerice*. Menționăm că există și *mașini analogice*, de care însă nu ne vom ocupa.

În mașinile de calculat se folosește sistemul de numerație binar pentru notarea numerelor și executarea operațiilor dintre ele. În sistemul zecimal, cu care sîntem obișnuiți, baza de numerație este 10. Cifrele din care este format un număr reprezintă coeficienții diferitelor puteri ale lui 10. De exemplu, numărul scris în sistemul zecimal 785 reprezintă:

$$785 = 7 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0.$$

Pentru notarea numerelor în sistemul zecimal sînt necesare zece simboluri diferite: cifrele de la 0 la 9. În sistemul binar, cu baza de numerație 2, sînt necesare numai 2 simboluri pentru a scrie numerele 0 și 1.

Sistemul zecimal	Sistemul binar	Sistemul zecimal	Sistemul binar
0	0	8	1 000
1	1	9	1 001
2	10	10	1 010
3	11	11	1 011
4	100	12	1 100
5	101	13	1 101
6	110	14	1 110
7	111	15	1 111

Cifrele din care este format un număr scris în sistemul binar reprezintă coeficienții puterilor lui 2. Astfel, numărul scris în sistemul binar 1001 reprezintă:
$1001 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$, adică numărul 9 din sistemul zecimal.

Scrierea numerelor în sistemul binar este mai puțin condensată decît în sistemul zecimal. Sistemul binar prezintă însă o serie de avantaje, care-l fac foarte adecvat folosirii în mașinile de calcul. Un avantaj este simplitatea efectuării operațiilor aritmetice în sistemul binar. Astfel, pentru adunarea numerelor în sistemul zecimal trebuie cunoscut rezultatul tuturor adunărilor cu cifre de la 0 la 9 luate cîte 2. În sistemul binar, pentru adunare este necesar să se cunoască numai patru reguli, date în tabela adunării de mai jos:

$0 + 0 = 0$

$0 + 1 = 1$

$1 + 0 = 1$

$1 + 1 = 0 +$ o unitate de transfer.

Unitatea de transfer se adaugă cifrelor de ordin superior. De asemenea, în sistemul binar și tabla înmulțirii este mult mai simplă, și anume:

$0 \times 0 = 0$ $\qquad$ $1 \times 0 = 0$

$0 \times 1 = 0$ $\qquad$ $1 \times 1 = 1$

Sistemul binar oferă și posibilitatea introducerii numerelor în mașina de calcul printr-o metodă simplă, folosind *benzi perforate*. Numerele se înscriu pe bandă ca o succesiune de perforații, și locuri neperforate. O perforație corespunde cifrei 1, iar

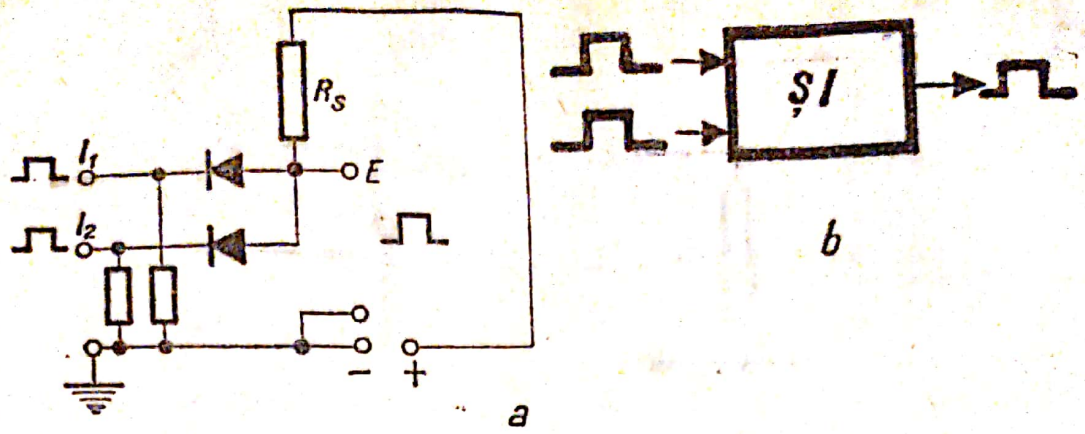


Fig. 12.26

un loc neperforat, cifrei zero. În dispozitivul de intrare al mașinii de calcul, banda trece prin fața unor celule fotoelectrice, care dau impuls electric cînd prin fața lor trece o perforație. Un impuls electric corespunde cifrei unu, iar lipsa impulsului corespunde cifrei zero. Dacă s-ar folosi sistemul zecimal, pentru reprezentarea numerelor în mașina de calcul ar fi necesare nouă impulsuri electrice diferite, corespunzătoare cifrelor 1—9, în afara lipsei de semnal corespunzătoare cifrei zero.

12.24. **Circuite logice.** Folosind reprezentarea numerelor prin semnale electrice, operațiile aritmetice în sistemul binar se efectuează cu ajutorul unor circuite electronice, numite circuite logice.

a) **Circuitul „ȘI".** Este reprezentat în figura 12.26, *a*. Circuitul are două intrări I_1 și I_2 (poate avea și mai mult de două) și o ieșire E. Dacă la intrări nu se aplică nici o tensiune exterioară, diodele conduc; pe rezistorul de sarcină R_s apare o cădere de tensiune, potențialul punctului E este scăzut. Dacă pe ambele diode se aplică *simultan* impulsuri de tensiune pozitive, ambele diode se blochează și pe rezistorul de sarcină nu mai apare căderea de tensiune. Potențialul punctului E crește, iar la ieșire se obține un impuls pozitiv de tensiune. Dacă la cel puțin o intrare nu se aplică o tensiune exterioară, dioda conduce, iar la ieșire nu se obține impulsul pozitiv. Așadar, la circuitul „ȘI" se obține un impuls pozitiv de tensiune la ieșire, numai dacă se aplică cîte un impuls pozitiv *și* la o intrare *și* la cealaltă (fig. 12.26, *b*).

b) **Circuitul „SAU".** Este reprezentat în figura 12.27. La circuitul „SAU" se obține un impuls de tensiune la ieșire cînd se aplică un impuls pozitiv *sau* la o intrare *sau* la cealaltă, *sau* la amîndouă o dată (fig. 12.27, *b*). Impulsul este aplicat pe rezistorul de sarcină și la ieșirea E se obține o creștere de tensiune, un impuls pozitiv.

c) **Circuitul „NU"** (fig. 12.28, *a*). Cînd nu se aplică tensiune la intrarea I, prin tranzistorul T practic nu trece curent, deci pe rezistorul de sarcină R_s nu este cădere

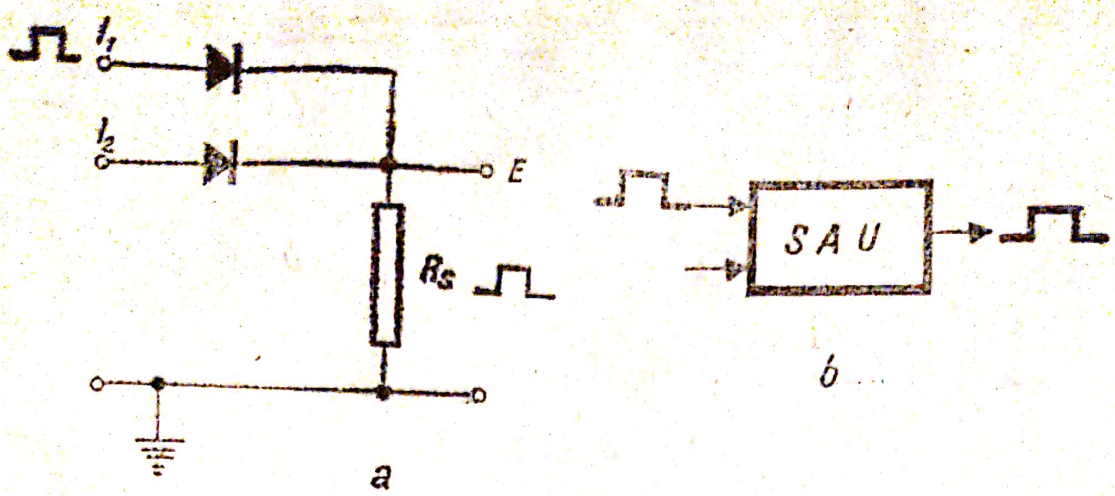


Fig. 12.27

de tensiune și la ieșirea E se obține chiar tensiunea pozitivă a sursei B. Lipsei de impuls la intrare îi corespunde o tensiune pozitivă la ieșire. Cînd se aplică un impuls pozitiv de tensiune la intrare, tranzistorul se deblochează, pe rezistorul de sarcină R_s apare cădere de tensiune, iar tensiunea la ieșire este mai mică decît tensiunea sursei E. Astfel, circuitul „NU" face să corespundă unui impuls pozitiv de tensiune de la intrare, lipsa de tensiune la ieșire, și invers (fig. 12.28, *b*).

12.25. **Sumator cu circuite logice.** Sumatorul este ansamblul de dispozitive care efectuează operațiile de adunare într-un calculator. Vom descrie funcționarea unui sumator care trebuie să adune două cifre binare (fig. 12.29). Sumatorul trebuie să aibă două intrări I_1, I_2 la care se aplică impulsurile corespunzătoare celor două cifre (fig. 12.29, *a*). Lipsa impulsului la intrare corespunde cifrei 0, iar existența unui impuls pozitiv cifrei 1. Sumatorul trebuie să aibă o ieșire S pentru cifra rezultat și o

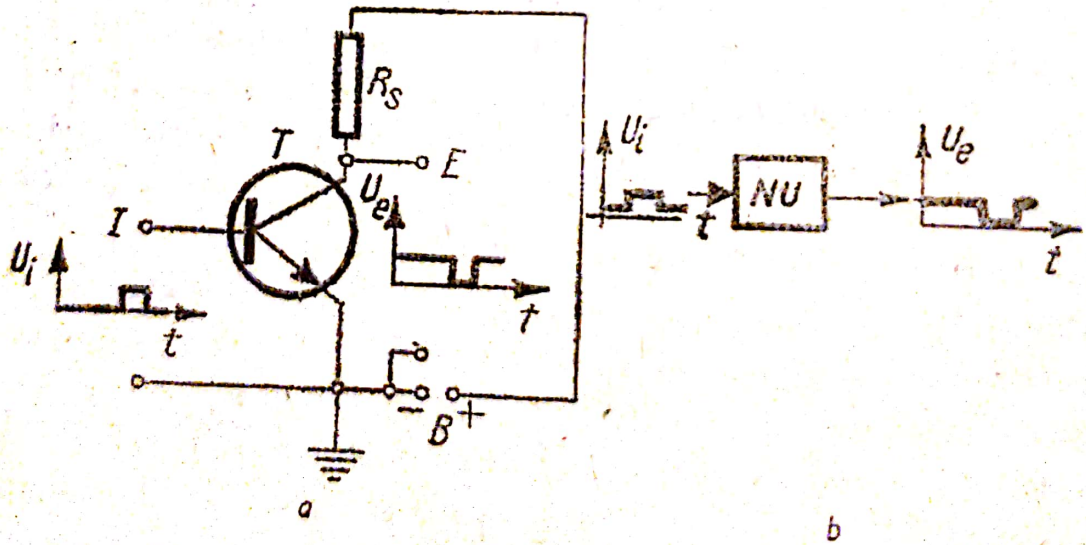
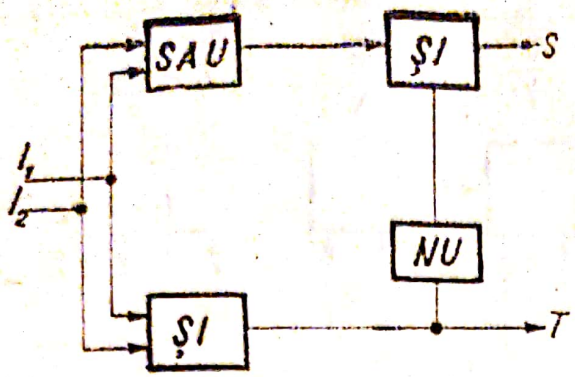


Fig. 12.28



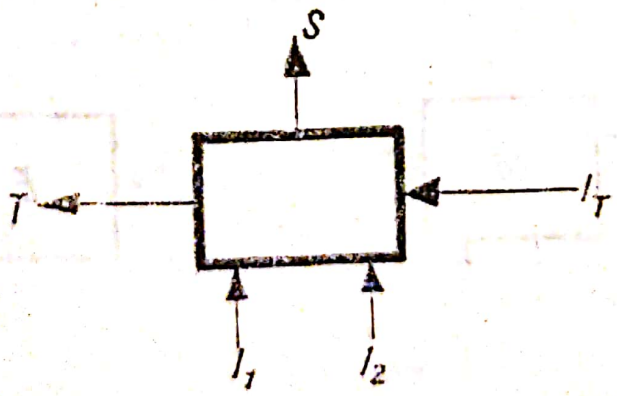
a

I_1	I_2	S	T
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

b

Fig. 12.29

ieșire T pentru cifra de transfer. Dacă la nici o intrare nu se aplică impulsuri (se realizează operația $0 + 0$), atît la ieșirea S cît și la cea T nu se obțin impulsuri, adică se obține tot 0. Dacă la ambele intrări se aplică un impuls (se realizează operația $1+1$), prin circuitul „*ŞI*“ se obține un impuls pozitiv la ieșirea T. Deci la ieșirea T se obține unitatea de transfer. Circuitul „*ŞI*“ de la ieșirea S are o intrare legată cu circuitul „*SAU*“, de la care primește un impuls pozitiv, iar cealaltă intrare legată cu circuitul „*NU*“, de la care nu primește un impuls pozitiv. La ieșirea S nu se obține deci un impuls pozitiv, adică rezultatul este cifra 0. Tabelul cu toate situațiile posibile pentru circuitul din figura 12.29, *a* este dat în figura 12.29, *b*. Un sumator complet (fig. 12.30) trebuie să aibă și o intrare de transfer I_T, de la care să primească cifra de transfer rezultată la adunarea cifrelor de ordin inferior. Tabelul cu toate situațiile posibile pentru acest circuit este dat în figura 12.30, *b*. Circuitul se poate realiza de asemenea din cîteva circuite logice *ŞI*, *SAU*, *NU*. În figura 12.31 este arătat un su-



a

I_1	I_2	I_T	S	T
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

b

Fig. 12.30

Scanned with OKEN Scanner

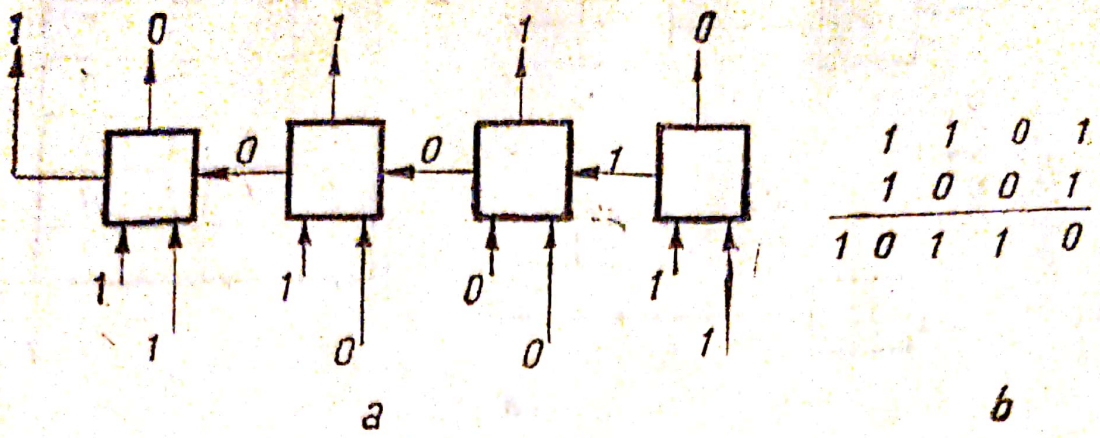


Fig. 12.31

mator pentru numere cu patru cifre binare. Operația de adunare (fig. 12.31, *b*) se realizează într-un timp extrem de scurt, de ordinul milionimilor de secundă. Această viteză mare se datorește faptului că se lucrează cu semnale electrice, a căror viteză de propagare de la un punct al circuitului la altul este foarte mare. Celelalte operații aritmetice se execută în intervale de timp la fel de scurte. Operații matematice mai complicate, reductibile de fapt la un șir de operații aritmetice, se execută de asemenea în intervale de timp foarte scurte.

12.26. **Părțile componente ale unei mașini numerice.** Schema bloc a unui calculator numeric este arătată în figura 12.32. Părțile componente ale calculatorului sînt: 1) *dispozitivul aritmetic A* (de calcul), 2) *dispozitiv de memorare M*, 3) *dispozitiv de comandă C*, 4) *dispozitiv de intrare* și 5) *dispozitiv de ieșire*.

Calculul propriu-zis se efectuează în *dispozitivul aritmetic*, prin intermediul unor circuite electronice speciale. Problema ce trebuie rezolvată se introduce prin *dispozitivul de intrare* în *dispozitivul de memorizare*, care este alcătuit dintr-o serie de celule de memorizare numerotate, numite adrese. Fiecare adresă poate înregistra un număr. Problema de rezolvat se descompune în două părți: *a)* datele inițiale, formate din numere și *b)* operațiile ce trebuie efectuate cu aceste date. Datele inițiale se introduc

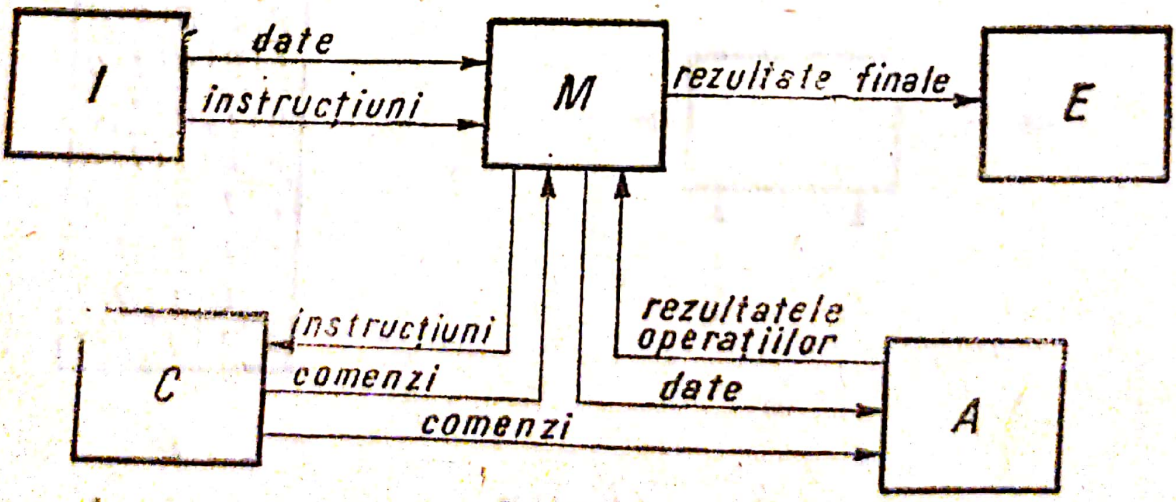


Fig. 12.32

fiecare într-o adresă. Pentru ca memoria să poată înregistra și operațiile, acestea trebuie codificate, adică fiecare operație se notează cu un număr. De exemplu adunarea se notează 02, iar înmulțirea 04. Operația ce trebuie efectuată între două numere reprezintă o *instrucțiune*. Instrucțiunea se reprezintă codificat prin numărul operației și numerele adreselor în care s-au înregistrat datele între care trebuie efectuată operația și eventual numărul adresei în care se trece rezultatul. De exemplu, instrucțiunea 02 40 57 20 reprezintă comanda: adună numărul din adresa 40 cu numărul din adresa 57 și trimite rezultatul în adresa 20. Totalitatea instrucțiunilor necesare pentru rezolvarea unei probleme, așezate într-o anumită ordine, constituie un *program*. Instrucțiunile pot fi înregistrate fiecare într-o adresă. Instrucțiunile dintr-un program ocupă adrese succesive din memoria calculatorului.

Dispozitivul de comandă analizează rînd pe rînd conținutul instrucțiunilor înregistrate de memorie, dirijează dispozitivul aritmetic pentru efectuarea operațiilor cerute, cît și pentru trimiterea rezultatelor la adresele corespunzătoare.

Dispozitivul de ieșire transmite în exterior rezultatele finale ale problemelor.

Întrebări, exerciții, probleme

1. Pentru ce oscilațiile libere în circuitul oscilant pot fi numai amortizate?
2. Energia cîmpului electric în circuitul oscilant este analogă cu energia potențială a unui resort elastic, iar energia cîmpului magnetic cu energia cinetică. Să se urmărească analogia între oscilațiile din circuitul oscilant și oscilațiile mecanice.
3. De ce mărimi depind amplitudinea și frecvența oscilațiilor în circuitul oscilant?
4. Care este perioada proprie de oscilație a unui circuit care are capacitatea $C = 200$ nF și inductanța $L = 800$ mH?

   Răspuns: $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ s.
5. Unde se găsește înmagazinată energia circuitului oscilant la o optime de perioadă de la începerea descărcării condensatorului?
6. Un circuit oscilant are frecvența de oscilație de 50 MHz. El se leagă la un generator de înaltă frecvență, a cărui frecvență este 5,5 HMz. Cu ce frecvență va oscila circuitul?
7. Un condensator, încărcat este introdus între polii unui magnet. Există și cîmp electric și cîmp magnetic. Se poate numi acest cîmp electromagnetic?
8. Rețeaua de curent alternativ de 50 Hz radiază unde electromagnetice?
9. O antenă legată la pămînt are lungimea de 3 m. Care este frecvența oscilațiilor proprii? Dar dacă nu ar fi legată la pămînt?

   Răspuns: 25 MHz; 50 MHz.
10. O antenă folosită pentru emiterea de unde de o anumită frecvență poate fi folosită pentru recepționarea undelor de aceeași frecvență?
11. Antenele de ferită (un material cu μ mare) acordate pentru o anumită frecvență sînt mult mai scurte decît antenele obișnuite acordate pe aceeași frecvență. De ce?
12. Depinde frecvența undelor emise de un emițător de frecvența proprie a antenei emițătorului?
13. Oscilațiile produse de un generator au frecvența de 1 000 kHz. Ele se modulează cu un semnal de 440 Hz. Care sînt frecvențele componentelor oscilațiilor modulate?

    Răspuns: 999,56 kHz; 1 000 kHz; 1 000,44 kHz.
14. Frecvența intermediară a unei superheterodine este 456 kHz, iar frecvența generatorului propriu este 2 000 kHz. Care este frecvența undelor recepționate?

    Răspuns: 1 544 kHz.

Scanned with OKEN Scanner

Anexă

Lucrări de laborator

• Lucrarea nr. 1

a. Tema. *Studiul circuitului electric*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentatorul IMD* de curent continuu și alternativ întreruptor, electroscop, becuri de 220 V, fire de legătură, voltmetru 250 V, ampermetru 1 A cu diviziunea zero la mijloc, lampă cu neon, hîrtie pentru polaritatea curentului electric, rezistor cu rezistență de 10 kΩ, bec de 4 V, fire de legătură cu fișe.

c. *Principiul metodei.* Se realizează un circuit electric și se cercetează pe rînd tensiunea, intensitatea și sensul curentului electric.

d. *Procedeu experimental.* 1. Se realizează montajul din figura I. Bornele B_1, B_2 sînt legate la o sursă continuă de 220 V. Se închide circuitul cu întreruptorul K. Foițele electroscopului C diverg: între bornele B_1B_2 *există tensiune.* Becurile L_1L_2 nu luminează: *nu circulă curent.* În locul lui L_2 se intercalează un ampermetru: acul său nu deviază.

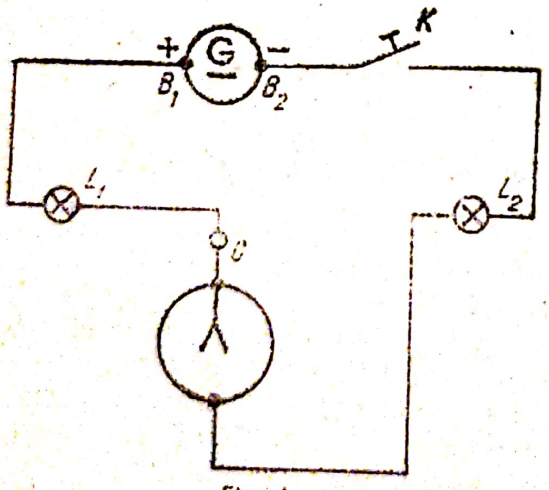


Fig. I.

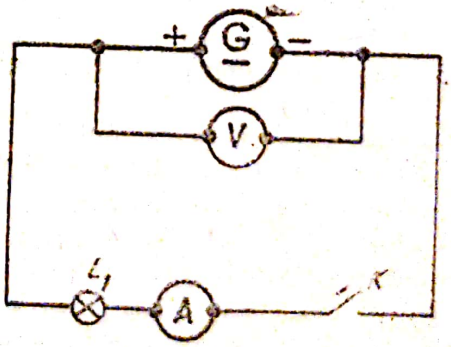


Fig. II.

* La toate lucrările în care intervin tensiuni mai mari de 60 V este necesar să se lucreze cu mare atenție deoarece este periculos.

Scanned with OKEN Scanner

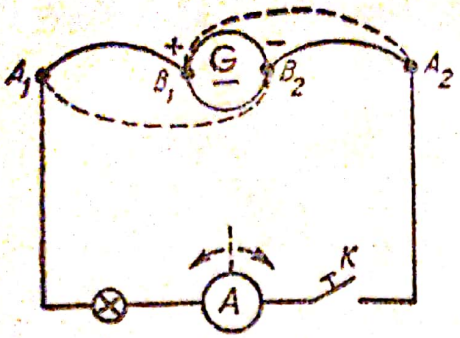


Fig. III.

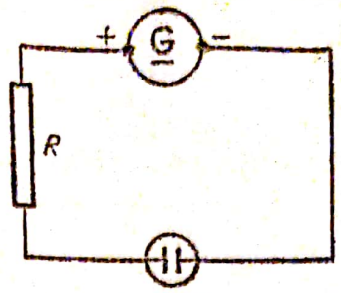


Fig. IV.

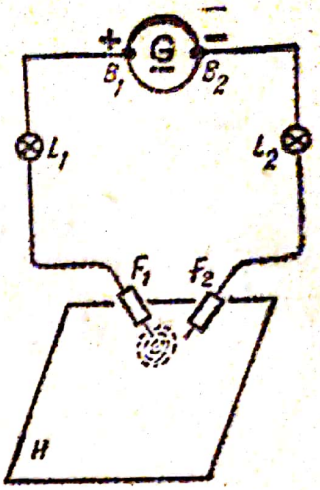


Fig. V.

2. Se face montajul din figura II, alimentat la o sursă continuă de 220 V. Deviația acului voltmetrului indică tensiunea. Curentul circulă prin becul L_1 numai la închiderea întreruptorului K.

3. Circuitul din figura III se închide prin firele A_1B_1 și A_2B_2, la o sursă continuă de 4 V. La închiderea lui K, acul ampermetrului deviază într-un sens; închizînd circuitul prin firele A_1B_2 și A_2B_1 (punctate, firele pline fiind înlăturate) acul ampermetrului A deviază în sens opus primului. Se repetă de mai multe ori.

4. Printr-o rezistență de 10 kΩ, se conectează o lampă cu neon la o tensiune continuă de 220 V (fig. IV). Electrodul în legătură cu polul negativ al sursei devine luminos. Schimbînd legătura la sursă, luminează celălalt electrod al lămpii cu neon.

5. Fișele F_1 și F_2 se pun în legătură cu bornele B_1B_2 ale unei surse cu tensiunea continuă de 220 V (fig. V), prin becurile L_1 și L_2 de 220 V fiecare. Foaia de hîrtie sugătoare H este îmbibată cu soluție de FI și amidon. Pe ea, așezată pe o placă de lemn sau alt izolator, se pun fișele F_1F_2. Se constată că una din ele, F_1 (în legătură cu polul pozitiv) produce în jurul ei o pată brună (ionul I^- reacționează cu amidonul). Schimbînd polaritatea la B_1B_2 cealaltă fișă produce pată brună.

e. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Din experiența 1 se deduce că la bornele unei surse este totdeauna o tensiune electrică. Circulă însă curent numai dacă circuitul este închis. Tensiunea este deci cauza, iar curentul electric este efectul ei.

Experiența 2 arată că intensitatea se măsoară cu ampermetrul legat în serie, iar tensiunea se măsoară cu voltmetrul legat în paralel.

Experiențele 3, 4 și 5 arată că un curent electric are sensul bine determinat. Sensul său depinde de sensul tensiunii electrice a sursei (fig. III), nu de consumatoarele din circuit.

• Lucrarea nr. 2

a. Tema. *Măsurarea intensității și măsurarea tensiunii electrice*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de curent continuu, reostat cu cursor 30 Ω, întreruptor, voltmetru, ampermetru, fire de legătură cu fișe.

c. *Principiul metodei.* Se măsoară intensitatea curentului și tensiunea la borne, pentru diferite valori ale rezistenței circuitului, $R \in (0, +\infty)$.

d. *Procedeu experimental.* Se face montajul din figura VI. Întreruptorul K fiind deschis, acul ampermetrului nu indică existența curentului electric. Voltmetrul V indică tensiunea $U = E$, tensiunea electromotoare a sursei de 4V. Se închide K, fiind cursorul C în M. Se citesc I și U.

Scanned with OKEN Scanner

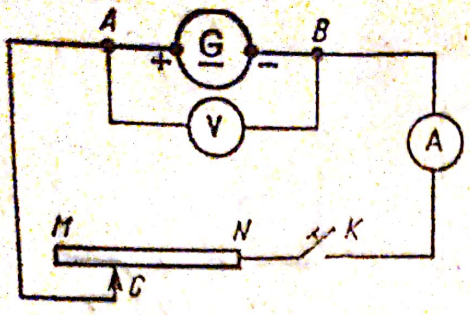


Fig. VI.

Pentru diferite poziții succesive ale lui C, de la M către N, se face citirea celor două perechi de valori I și U. Dacă deviația acului lui A ajunge la limita scalei, se atașează ampermetrului un șunt corespunzător.

e. *Tabel de rezultate.* Toate rezultatele citirilor se trec într-un tabel de rezultate.

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* În circuit deschis, tensiunea la borne este egală cu t.e.m. În circuit închis intensitatea crește, cînd rezistența scade, t.e.m. rămînînd constantă. Se observă încă o dată că ampermetrul se conectează în serie, iar voltmetrul în paralel.

	R	U	I	E
K deschis	∞		0	
K închis				

• Lucrarea nr. 3

a. **Tema.** *Verificarea legii lui Ohm*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de curent continuu, potențiometru, scîndură cu trei rezistoare, ampermetru 2 A, voltmetru 10 V, întreruptor, fire de legătură cu fișe. Scîndura cu trei rezistoare este o scîndură (fig. VII) pe care sînt fixate trei fire de constantan cu diametrul de 0,3 mm și lungimea de 40 cm. Capetele fiecărui fir sînt fixate, prin sudare, la cîte o bucșă (1—2—3—4—5—6). Un asemenea fir are 2,8 Ω. Sub fire, pe scîndură se lipește hîrtie milimetrică.

c. *Principiul metodei.* Se studiază variația intensității curentului cu tensiunea, pentru rezistență constantă și variația intensității curentului cu rezistența, pentru tensiune constantă.

d. *Procedeu experimental.*

1. R = *constant.* Se alcătuiește montajul din figura VIII, unindu-se bucșele 2—3 și 4—5 prin fire de legătură cu fișe. Tensiunea de alimentare se ia de 8 V. Se aduce cursorul C în M, apoi este deplasat către N. Pentru fiecare poziție intermediară a cursorului se citesc U și I la voltmetrul V și ampermetrul A. Rezultatele obținute se trec în tabelul de rezultate.

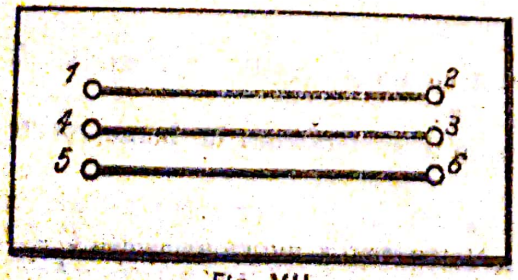


Fig. VII.

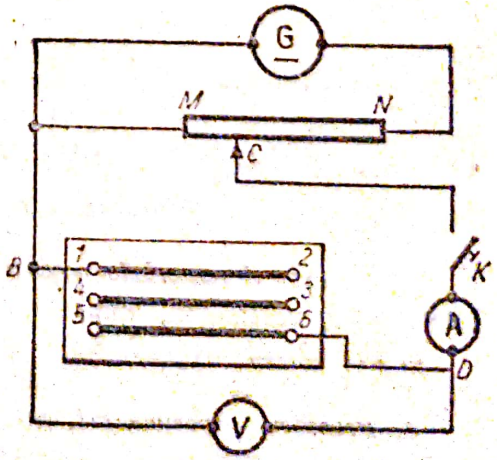


Fig. VIII.

Se repetă măsurătorile pentru o altă valoare a lui R: nodul D se leagă la bucșa 4 în loc de 6. Se alcătuiește al doilea tablou de rezultate.

U volți	I amperi	$\frac{U}{I}$ = const.	R ohmi
2			
4			
6			
8			

2. U = *constant*. Montajul este același; alimentarea circuitului se face la tensiune continuă constantă de 2 V. Nodul D se leagă întîi la bucșa 2, apoi la bucșa 4, unindu-se bucșele 2—3 printr-un fir de legătură cu fișe, apoi la bucșa 6, unindu-se și bucșele 4—5 prin fir de legătură cu fișe. Pentru fiecare poziție se citesc I și U corespunzătoare, trecîndu-se în tabelul de rezultate, ținîndu-se seamă că un singur fir are 2,8 Ω.

R ohmi	I amperi	IR = const. volți	U volți
2,8			
5,6			
8,4			

e. *Valorificarea rezultatelor*. Din primul tabel de rezultate se observă că, rezistența rămînînd constantă, intensitatea crește de 2, 3, 4 ori cînd tensiunea crește de 2, 3, 4 ori. Deci: *intensitatea variază proporțional cu tensiunea, cînd rezistența rămîne constantă*, $I \sim U$. Se constată același lucru, reprezentînd grafic rezultatele, $I = f(U)$ pentru R = const. Pe abscisă se reprezintă tensiunea, iar pe ordonată intensitatea (fig. IX). Al doilea tabel de rezultate duce la concluzia că RI = const., adică *intensitatea variază invers proporțional cu rezistența, cînd tensiunea rămîne constantă*, $I \sim \frac{1}{R}$. Același rezultat se obține prin reprezentarea grafică punînd rezistența pe abscisă și intensitatea pe ordonată. În concluzie se deduce legea lui Ohm:

$$I = \frac{U}{R}$$

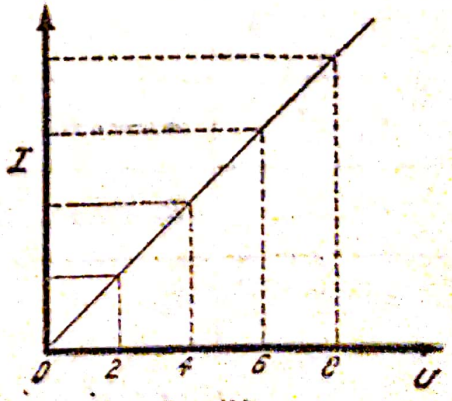


Fig. IX.

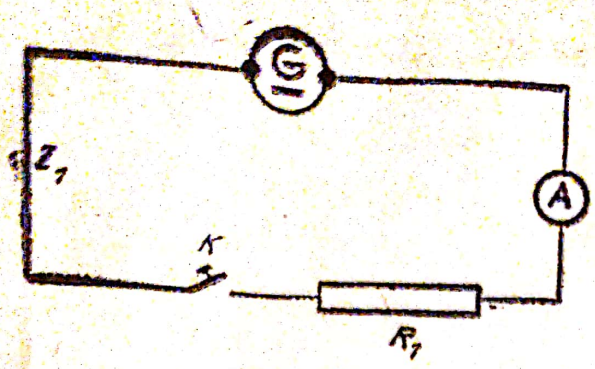


Fig. X.

• Lucrarea nr. 4

a. Tema. *Determinarea t. e. m. a unui generator*

b. *Aparate și materiale necesare.* Generator electric (element galvanic, baterie de buzunar), cutie de rezistențe, ampermetru, întreruptor, fire de legătură cu fișe.

c. *Principiul metodei.* În circuitul generatorului închis printr-o rezistență exterioară R_1, se măsoară intensitatea I_1 (fig. X) și se aplică legea lui Ohm pe circuitul întreg:

$$E = I_1(R_1 + r),$$

E și r fiind t.e.m. și rezistența interioară de măsurat. Se repetă operația pentru altă rezistență exterioară R_2:

$$E = I_2(R_2 + r).$$

Din aceste relații se deduce succesiv:

$$r = \frac{R_2 I_2 - R_1 I_1}{I_1 - I_2}, \qquad (a)$$

și

$$E = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}. \qquad (b)$$

Rezistența exterioară R_1, R_2 etc. include și rezistența R a ampermetrului A.

d. *Procedeu experimental.* Se realizează montajul din figura X. Rezistența exterioară $R_1 = R_1' + R_A$ unde R_1' este rezistența obținută din cutia de rezistențe. Se închide întreruptorul K și se citește intensitatea I_1. Pentru prima experiență se ia $R_1' = 4\,\Omega$, deci $R_1 = 4 + R_A$.

Se repetă experiența, luînd $R_2' = 6\,\Omega$, deci $R_2 = 6 + R_A$ și se citește I_2.

Se repetă experiența cu $R_3' = 8\,\Omega$, deci $R_3 = 8 + R_A$, obținîndu-se curentul I_3. Aceeași operație pentru $R_4' = 10\,\Omega$, curentul fiind I_4.

e. *Tabel de rezultate*

R' ohmi	R_A ohmi	$R = R' + R_A$ ohmi	I amperi	$r = \frac{R_2 I_2 - R_1 I_1}{I_1 - I_2}$	media ohmi	$E = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_2 - I_1}$	media volți
4		$R_1 = 4 + \ldots$	$I_1 =$				
6		$R_2 = 6 + \ldots$	$I_2 =$	$\frac{R_2 I_2 - R_1 I_1}{I_1 - I_2}$			
8		$R_3 = 8 + \ldots$	$I_3 =$	$\frac{R_3 I_3 - R_1 I_1}{I_1 - I_3}$			
10		$R_4 = 10 + \ldots$	$I_4 =$	$\frac{R_4 I_4 - R_1 I_1}{I_1 - I_4}$			

Scanned with OKEN Scanner

Media celor trei valori ale lui r și media celor trei valori ale lui E sînt cele mai apropiate tate de valorile reale.

f. *Valorificarea rezultatelor.* Cu ajutorul celor patru experienţe se pot calcula cîte trei valori pentru r, respectiv pentru E.

• Lucrarea nr. 5

a. Tema. *Dependenţa rezistenţei unui conductor de natura şi dimensiunile lui*

b. *Aparate şi materiale necesare.* Alimentator de curent continuu, potenţiometru, scîndură cu trei rezistoare, ampermetru 2 A, voltmetru 10 V, întreruptor, fire de legătură cu fişe.

c. *Principiul metodei.* Prin măsurarea tensiunii U şi intensităţii I într-un circuit, se deduce rezistenţa R a firului exterior pentru diferite lungimi şi pentru diferite secţiuni din acelaşi material şi pentru fire din materiale diferite.

d. *Procedeu experimental,* 1. *Dependenţa de lungime.* În montajul din figura VIII alimentat la 4 V, se leagă nodul D la bucşa 2 şi se citesc I şi U. Se leagă nodul D la bucşa 4, unindu-se bucşele 2—3 printr-un fir de legătură cu fişe. Conductorul are lungimea dublă faţă de cazul precedent. După închiderea întreruptorului se citesc I şi U. Se trece apoi legătura la bucşa 6, unindu-se bucşele 2—3 şi 4—5 prin fire de legătură cu fişe. Conductorul avînd lungimea de trei ori mai mare, se citesc I şi U. Rezultatele se trec în tabel.

Lungimea m	S	I A	U V	$R=\frac{U}{I}$ Ω	$\frac{R}{l}$ = const. Ω/m
0,4	1				
0,8	1				
1,2	1				

2. *Dependenţa de secţiune.* Se repetă prima operaţiune de la cazul 1. Se leagă apoi nodul D cu bucşa 3, unindu-se bucşele 1—4 şi 2—3 prin fire de legătură cu fişe. Fiind două conductoare identice, în paralel se comportă ca un conductor de aceeaşi lungime, dar cu secţiune dublă. Se închide întreruptorul şi se citesc I şi U.

Se leagă apoi nodul D la bucşa 6, unindu-se între ele bucşele 1—4—5 şi bucşele 2—3—6. E un conductor de aceeaşi lungime, dar cu secţiune triplă. Se citesc I şi U. În toate cazurile alimentarea circuitului este aceeaşi: 2 V. Rezultatele se trec într-un tabel.

secţiunea			I A	U V	$R=\frac{U}{I}$ Ω	$R \cdot S$ = const. Ω·mm²
S	m²					
1	0,07	1				
2	0,14	1				
3	0,21	1				

3. *Dependenţa de material.* În montajul din figura VIII, se lucrează ca la experienţa 1 (conductor de lungime 0,8 m), măsurînd I la tensiunea de 2 V. Se face aceeaşi măsurătoare, folosind însă un fir din fier, cu lungimea de 0,8 m şi diametrul 0,3 mm, măsurînd I_1 tot la tensiunea de 2 V. Se constată că $I_1 > I$.

Scanned with OKEN Scanner

Media celor trei valori ale lui r și media celor trei valori ale lui E sînt cele mai apropiate rezultate de valorile reale.

f. Valorificarea rezultatelor. Cu ajutorul celor patru experienţe se pot calcula cîte trei valori pentru r, respectiv pentru E.

• Lucrarea nr. 5

a. Tema. *Dependenţa rezistenţei unui conductor de natura şi dimensiunile lui*

b. *Aparate şi materiale necesare.* Alimentator de curent continuu, potenţiometru, scîndură cu trei rezistoare, ampermetru 2 A, voltmetru 10 V, întreruptor, fire de legătură cu fişe.

c. *Principiul metodei.* Prin măsurarea tensiunii U şi intensităţii I într-un circuit, se deduce rezistenţa R a firului exterior pentru diferite lungimi şi pentru diferite secţiuni din acelaşi material şi pentru fire din materiale diferite.

d. *Procedeu experimental,* 1. *Dependenţa de lungime.* În montajul din figura VIII alimentat la 4 V, se leagă nodul D la bucşa 2 şi se citesc I şi U. Se leagă nodul D la bucşa 4, unindu-se bucşele 2—3 printr-un fir de legătură cu fişe. Conductorul are lungimea dublă faţă de cazul precedent. După închiderea întreruptorului se citesc I şi U. Se trece apoi legătura la bucşa 6, unindu-se bucşele 2—3 şi 4—5 prin fire de legătură cu fişe. Conductorul avînd lungimea de trei ori mai mare, se citesc I şi U. Rezultatele se trec în tabel.

Lungimea m	S	I A	U V	$R = \frac{U}{I}$ Ω	$\frac{R}{l}$ = const. Ω/m
0,4	1				
0,8	1				
1,2	1				

2. *Dependenţa de secţiune.* Se repetă prima operaţiune de la cazul 1. Se leagă apoi nodul D cu bucşa 3, unindu-se bucşele 1—4 şi 2—3 prin fire de legătură cu fişe. Fiind două conductoare identice, în paralel se comportă ca un conductor de aceeaşi lungime, dar cu secţiune dublă. Se închide întreruptorul şi se citesc I şi U.

Se leagă apoi nodul D la bucşa 6, unindu-se între ele bucşele 1—4—5 şi bucşele 2—3—6. E un conductor de aceeaşi lungime, dar cu secţiune triplă. Se citesc I şi U. În toate cazurile alimentarea circuitului este aceeaşi: 2 V. Rezultatele se trec într-un tabel.

secţiunea			I A	U V	$R = \frac{U}{I}$ Ω	$R \cdot S$ = const. Ω·mm²
S	mm²					
1	0,07	1				
2	0,14	1				
3	0,21	1				

3. *Dependenţa de material.* În montajul din figura VIII, se lucrează ca la experienţa 1 (conductor de lungime 0,8 m), măsurînd I la tensiunea de 2 V. Se face aceeaşi măsurătoare, folosind însă un fir din fier, cu lungimea de 0,8 m şi diametrul 0,3 mm, măsurînd I_1 tot la tensiunea de 2 V. Se constată că $I_1 > I$.

Scanned with OKEN Scanner

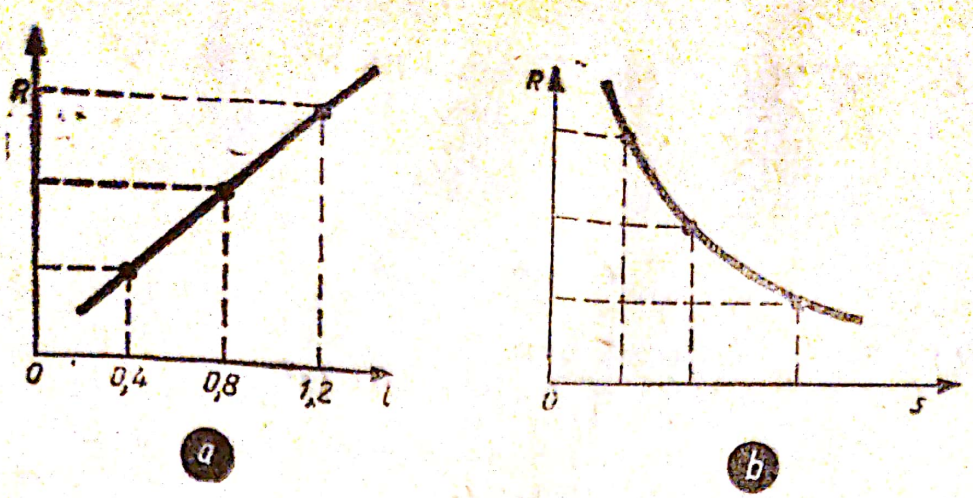


Fig. XI.

e. *Valorificarea rezultatelor.* Din primul tabel de rezultate reiese că *pentru un conductor de secțiune constantă, rezistența variază direct proporțional cu lungimea* $\frac{R}{l}$ = const., adică $R \sim l$. Reprezentarea grafică $R = f(l)$, punînd lungimea pe abscisă și rezistența pe ordonată (fig. XI, *a*) face vizibilă această relație.

Din al doilea tabel de rezultate se deduce că *pentru un conductor de lungime constantă, rezistența variază invers proporțional* cu secțiunea: $R \cdot S$ = const, adică $R \sim \frac{1}{S}$ (fig. XI, *b*). Se deduce că $R \sim \frac{l}{S}$ adică $R = \rho \frac{l}{S}$, unde ρ este factorul de proporționalitate, numit rezistivitate. Din experiența nr. 3 se constată că rezistivitatea depinde de natura conductorului.

• Lucrarea nr. 6

a. **Tema.** *Studiul conectării în paralel a rezistoarelor*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de curent continuu, potențiometru, scîndură cu trei rezistoare, ampermetru 3 A, voltmetru 10 V, întreruptor, fire de legătură cu fișe.

c. *Principiul metodei.* Rezistențele se măsoară prin citirea tensiunii la capete și a intensității prin fir (metoda voltampermetru). Se măsoară întîi rezistența R_1 a firului de lungime l (între bucșele 1—2, fig. VIII), apoi rezistența R_2 a două fire de lungime l, legate în paralel (între bucșele 1—4 comune și bucșele 2—3 comune), apoi rezistența R_3 a trei fire de lungime l, legate în paralel (între bucșele 1—4—5 comune și între 2—3—6 comune). Se calculează $\frac{1}{R_2}$ și $\frac{1}{R_3}$ și se compară cu $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1}$ respectiv $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1}$. Se compară apoi I_2 și I_3 cu $2I_1$ respectiv $3I_1$.

d. *Procedeu experimental.* Montajul folosit este cel din figura VIII. Nodul D se leagă la bucșa 2 pentru a măsura rezistența rezistorului 1—2 de lungime l. Se reglează potențiometric tensiunea $U = 2$ V, citită la voltmetrul V, după închiderea întreruptorului K. Se citește la ampermetru A intensitatea I_1.

A doua măsurătoare se face unind bucșele 1—4 și 2—3 prin fire de legătură cu fișe, iar nodul D este legat la bucșa 3: sînt legate în paralel două rezistoare de lungime l. Se reglează potențiometric tensiunea $U = 2$ V și se citește I_2.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a treia măsurătoare se unesc bucşele 1—4—5 împreună şi bucşele 2—3—6 împreună, iar nodul D se leagă la una din bucşele 2—3—6; sînt legate în paralel trei rezistoare de lungime l. Se reglează potenţiometric tensiunea $U = 2$ V şi se citeşte I_3.

c. *Tabele de rezultate*

U volţi	rezistoare	I amperi	$R = \frac{U}{I}$ ohmi	$\frac{1}{R}\,\Omega^{-1}$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$	$\Delta\frac{1}{R}$
2	1 fir	$I_1 = \ldots$	$R_1 = \ldots$	$\frac{1}{R_1} = \ldots$		
2	2 fire	$I_2 = \ldots$	$R_2 = \ldots$	$\frac{1}{R_2} = \ldots$	$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \ldots$	
2	3 fire	$I_3 = \ldots$	$R_3 = \ldots$	$\frac{1}{R_3} = \ldots$	$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \ldots$	

U volţi	rezistoare	I amperi	$I = I_1 + I_1 + I_1$	ΔI
2	1 fir	$I_1 = \ldots$		
2	2 fire	$I_2 = \ldots$	$I_1 + I_1 = \ldots$	
2	3 fire	$I_3 = \ldots$	$I_1 + I_1 + I_1 = \ldots$	

$\Delta\frac{1}{R}$ este diferenţa dintre valorile corespunzătoare din coloana a 6-a şi coloana a 5-a. ΔI este diferenţa dintre valorile corespunzătoare din coloanele 4 şi 3.

d. *Valorificarea rezultatelor*. Din primul tabel de rezultate reiese că inversul rezistenţei echivalente este egal cu suma inverselor rezistenţelor legate în paralel. Din al doilea tabel de rezultate se deduce valabilitatea primei teoreme a lui Kirchhoff.

• Lucrarea nr. 7

a. Tema. *Determinarea rezistenţei electrice a unui rezistor, cu ajutorul voltmetrului şi ampermetrului*

b. *Aparate şi materiale necesare*. Reşou cu valorile nominale 220 V—600 W, bec electric cu valorile nominale 220 V—25 W, ampermetru, voltmetru, alimentator de tensiune continuă 6...10 V, fire de legătură cu fişe, întreruptor.

c. *Principiul metodei*. Ampermetrul se montează în serie cu rezistenţa de măsurat. În cazul rezistoarelor cu rezistenţă mică (reşou) voltmetrul se conectează la bornele rezistorului (fig. 2.28); în cazul rezistoarelor cu rezistenţă mare (bec) voltmetrul se conectează la bornele sursei (fig. 2.27) aşa cum s-a arătat în paragrafele 2.25 şi 2.24. Valoarea rezistenţei se obţine prin împărţirea tensiunii U la intensitatea I, citite la voltmetru, respectiv ampermetru.

d. *Procedeu experimental*. 1. *Rezistenţe mici*. Pentru a măsura rezistenţa R necunoscută a unui reşou, îl montăm ca în figura 2.28, folosind voltmetrul V de 10 V, cu rezistenţa R_V şi ampermetrul A de 5 A, cu rezistenţa R_A. În serie cu sursa se montează şi un întreruptor (nu e pe figură). La alimentator se reglează tensiunea U la 6 V, se închide întreruptorul şi se citesc

Scanned with OKEN Scanner

U și I. Se repetă aceleași măsurători pentru 8 V și apoi pentru 10 V. Rezultatele se trec în tabelul de rezultate.

2. *Rezistențe mari.* Se montează becul de rezistență necunoscută R ca în figura 2.27. În serie cu sursa se montează un întreruptor, care nu-i trecut pe figură. Se fac exact aceleași operații, în aceeași ordine, ca în experiența precedentă, iar rezultatele se trec în tabel.

e. *Tabelul de rezultate*

Rezistorul	U volți	I amperi	$R=\frac{U}{I}$ ohmi	$R=\frac{U}{I-\frac{U}{R_V}}$	$R=\frac{U-IR_A}{I}$	media
reșou					X	
					X	
					X	$R=\ldots$
bec				X		
				X		
				X		$R=\ldots$

7. *Valorificarea rezultatelor.* Cu formula $R \approx \frac{U}{I}$ se calculează valoarea rezistenței, apropiată de valoarea adevărată, deoarece se neglijează curentul $I_V = \frac{U}{R_V}$ din voltmetru, în primul caz și căderea de tensiune $\Delta U = IR_A$ de la bornele ampermetrului, în al doilea caz. Diferența $R_1 - R = \Delta R$ indică eroarea făcută la citire. Se vor lua valorile medii ale lui R, pentru reșou, apoi pentru bec.

Se vor calcula rezistențele nominale, prin valorile nominale înscrise pe reșou, respectiv bec: $V - P$.

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P}.$$

Ce se constată comparînd aceste valori nominale cu valorile medii, pentru reșou, respectiv pentru bec? Cum se explică?

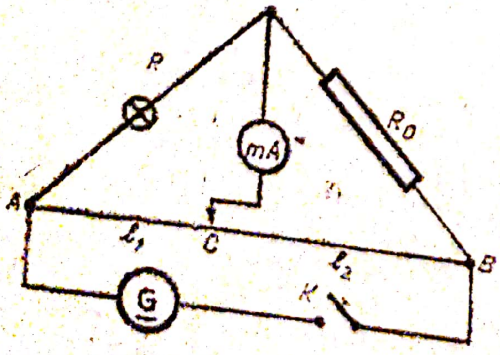


Fig. XII.

• Lucrarea nr. 8

a. Tema. *Determinarea rezistenței unui rezistor cu ajutorul punții cu fir (§ 126)*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator cu tensiune continuă 4—6 V, punte cu fir, întreruptor, cutie cu rezistențe, rezistor (filamentul unui bec, fir metalic etc.), miliampermetru cu diviziunea zero la mijloc, fire de legătură cu fișe, reostat, micrometru, fir de constantan.

Scanned with OKEN Scanner

c. *Principiul metodei.* Prin echilibrarea punții (fig. XII) se poate scrie relația $Rl_2 = R_0 l_1 \Rightarrow R = R_0 \frac{l_1}{l_2}$ adică se poate calcula rezistența R cunoscînd valoarea rezistenței R_0 și lungimile l_1 și l_2.

d. *Procedeu experimental.* 1. Se realizează dispozitivul experimental din figura XII ca rezistor, folosind filamentul unui bec, a cărui rezistență trebuie măsurată. Tensiunea de alimentare a instalației avînd 4—6 V, filamentul nu este în regim de funcționare nominală, deci se află rezistența filamentului la temperatura camerei ($\approx 20°C$).

Se închide întreruptorul K și se deplasează încet cursorul C de la $A—B—A$, urmărind deviațiile acului miliampermetrului. La o deplasare a lui C între A și B, acul trebuie să devieze de o parte și de alta a lui zero. Dacă poziția lui C, pentru deviație nulă, este aproape de A, înseamnă că R_0 are valoare prea mare și trebuie micșorată. Dacă poziția cursorului C, pentru deviație nulă a acului, este aproape de B, urmează că R_0 are valoare prea mică și trebuie mărită. Se aduce cursorul C cam la mijlocul firului AB, și se potrivește valoarea lui R_0 la cutia de rezistențe așa fel ca acul miliampermetrului să nu devieze la închiderea și deschiderea repetată a lui K. Dacă nu se poate obține acest lucru, se lasă valoarea lui R_0 care dă cea mai mică deviație a instrumentului. Apoi se deplasează încet cursorul C spre dreapta ori spre stînga pînă se obține deviația nulă a acului: acesta nu deviază la închiderea-deschiderea lui K. Se citesc lungimile $AC = l_1$ și $CB = l_2$, precum și valoarea corespunzătoare a lui R_0. Se repetă operația de trei ori, variind tensiunea de alimentare. Pentru a feri instrumentul de eventuale deteriorări este bine să se intercaleze în serie cu sursa, între A și B, o rezistență de peste 100 Ω (un reostat) neetalonată. Rezultatele se trec într-un tabel de rezultate. Valoarea nominală R_n a rezistenței se poate scoate din valorile nominale înscrise pe bec:

$$R_n = \frac{U^2}{P}.$$

2. Ca rezistor se poate folosi un fir de constantan (sau alt fir metalic), lung de 1—3 m, întins pe masă ori pe un suport din lemn. Se procedează experimental ca în experiența 1. Se măsoară apoi cu metrul lungimea l a firului și diametrul său $2r$ cu un micrometru pentru a-i calcula rezistivitatea ρ. Se repetă de trei ori.

e. *Tabelele de rezultate.* 1. Rezistența filamentului becului.

Rezistor	R_0	l_1	l_2	$R = R_0 \frac{l_1}{l_2}$	Media	$Rn = \frac{U_n^2}{Pn}$	$t = \frac{Rn - R}{R}$
bec						X	X
						X	X

2. Rezistivitatea unui fir.

Rezistor	R_0	l_1	l_2	$R = R_0 \frac{l_1}{l_2}$	l	πr^2	$\rho = \frac{R\pi r^2}{l}$	Media
Fir								X
								X

Scanned with OKEN Scanner

f. *Valorificarea rezultatelor.* 1. Din valoarea R a rezistenței firului la temperatura camerei și valoarea nominală R a rezistenței, dedusă din valorile ei nominale, se poate deduce temperatura la care funcționează becul: $R_n = R(1 + \alpha \cdot \Delta t)$. De unde:

$\Delta t = \frac{R_n - R}{R \cdot \alpha} \Rightarrow t = \frac{R_n - R}{R \cdot \alpha} + t_0$, t_0 fiind temperatura camerei în care se lucrează. Valoarea coeficientului termic al rezistivității α se ia din tabele. Pentru tungsten $\alpha = 0{,}0045\ grd^{-1}$.

Din al doilea tabel de rezultate se poate deduce rezistența R a firului, precum și rezistivitatea sa.

• Lucrarea nr. 9

a. Tema. *Măsurarea puterii și energiei electrice*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de curent continuu, consumator (un bec electric), voltmetru electromagnetic 220 V, ampermetru electromagnetic 5 A, cronometru stop, întreruptor, fire de legătură cu fișe.

c. *Principiul metodei.* Un consumator R (un bec, un reșou) conectat la o tensiune U și străbătut de un curent I absoarbe puterea $P = UI$, în cazul curentului continuu.

Dacă acest consumator are numai rezistență, cum sînt becul și reșoul, formula este valabilă și pentru curentul alternativ, neexistînd defazaj între U și I. Energia consumată în timpul t va fi: $W = Pt = UIt$.

d. *Procedeu experimental.* Consumatorul R (bec ori reșou) este conectat ca în figura XIII, la rețeaua de 110 V ori 220 V (curent continuu sau alternativ). Se închide întreruptorul K. Se notează momentul t_0 inițial și se citesc, din minut în minut, tensiunea U și curentul I, timp de 5 minute. Rezultatele se trec într-un tabel.

e. *Tabel de rezultate*

t_0	t	$\Delta t = t - t_0$	U		$W = UI \cdot \Delta I$	$P = UI$	media

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Durata consumului de energie este $\Delta t = t - t_0$ secunde. Cele șase perechi de valori pentru U și I pot fi diferite: de aceea se face media lui U și media lui I. Cu aceste valori medii se calculează energia $W = UIt$ joule și puterea $P = UI$ watt. Dacă consumatorul conține înfășurări, atunci puterea, în cazul curentului alternativ, se măsoară cu wattmetrul, deoarece există defazări între U și I.

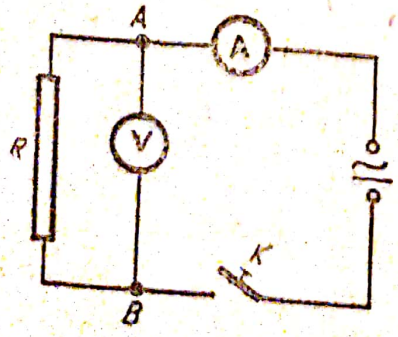


Fig. XIII.

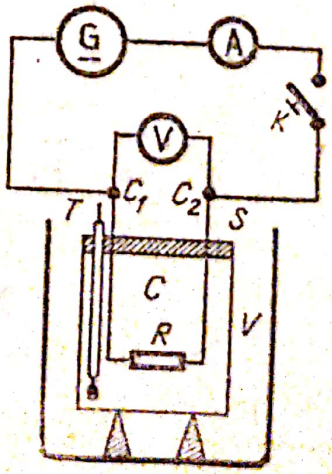


Fig. XIV.

Scanned with OKEN Scanner

• Lucrarea nr. 10

a. Tema. *Verificarea legii lui Joule*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de curent continuu 6—8 V, rezistențe din nichelină sau constantan spiralate $\approx 4\ \Omega$, voltmetru 10 V, ampermetru, întreruptor, vas calorimetric (fig. XIV), cronometru, termometru cu zecimi de grad, fire de legătură cu fișe.

c. *Principiul metodei.* O rezistență R este introdusă într-un calorimetru de masă m și căldură specifică c, în care se află masa m_1 de petrol, cu căldura specifică c_1. Dacă θ_0 este temperatura inițială a petrolului și θ temperatura lui finală, el se încălzește cu $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ grade, primind energia ce este transmisă de curentul electric, sub formă de căldură. Măsurînd cele două forme ale aceleiași cantități de energie electrică $W = UIt$ și termică $Q = (mc + m_1c_1)\Delta\theta$, ele trebuie să fie egale:

$$UIt = (mc + m_1c_1)\Delta\theta,$$

neglijindu-se pierderile. Expresia din paranteză reprezintă capacitatea calorică M a vasului calorimetric cu petrol și poate fi calculată $M = mc + m_1c_1 \frac{\text{joule}}{\text{grd}}$, încît se poate scrie:

$$UIt = M \cdot \Delta\theta.$$

d. *Procedeu experimental.* În locul consumatorului R din montajul din figura XIII, se conectează rezistorul spiralat, aflat în vasul calorimetric C. Acesta este introdus în vasul exterior V. Ca agitator în calorimetru servește chiar rezistorul, pe care îl rotim încet la dreapta și la stînga cu ajutorul scîndurii S, pe care sînt fixate sîrmele de cupru C_1 și C_2, de care-i sudat rezistorul.

Prin cîntărire se află masa m a vasului calorimetric C. Cîntărind apoi vasul cu petrol și scăzînd masa vasului se află masa m_1 a petrolului. Căldurile lor specifice se iau din tabele. Se calculează M.

Se notează momentul t_0 al închiderii întreruptorului K și se citesc temperatura θ_0 în acel moment, precum și valorile lui U și I. Se agită petrolul cum s-a arătat mai înainte și se urmărește urcarea temperaturii în vasul calorimetic, pînă crește cu circa 2 grd. Se notează timpul t_1 și se întrerupe circuitul, citind și temperatura finală θ.

Valorile se trec în tabelul de rezultate. Se repetă operațiile.

e. *Tabele de rezultate*

t_0	U	I	t_1	$t = t_1 - t_0$	$W = UIt$ joule	media

Pentru capacitatea calorică

m kg	c $\frac{\text{joule}}{\text{kg·grd}}$	m_1 kg	c_1 $\frac{\text{joule}}{\text{kg·grd}}$	$M = mc + m_1c_1$ $\frac{\text{joule}}{\text{grd}}$	
			2134,4		

Pentru energia termică și legea Joule

M joule/grd	θ_0	θ	$\Delta\theta = \theta - \theta_0$ grd	$Q = M \cdot \Delta\theta$ joule	W joule	$W - Q$
				2134,4		

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Energia electrică, în joule, se calculează cu rezultatele din primul tabel. Cu rezultatele din tabelul al doilea se calculează capacitatea calorică M a vasului calorimetric, cu căldura specifică c, și a petrolului — cu căldura specifică $c_1 = 2\,134{,}4 \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{grd}}$ — din vasul calorimetric. Rezultatele din al treilea tabel permit calcularea cantității de căldură $Q = M \cdot \Delta\theta$, care este comparată cu energia echivalentă a curentului electric. Ce valoare trebuie să aibă diferența $W - Q$? Din ce cauză, în general, nu are exact această valoare?

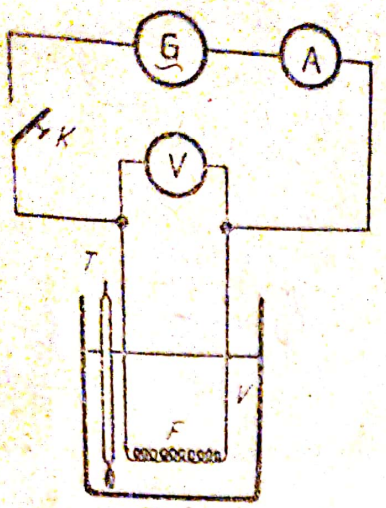


Fig. XV.

• Lucrarea nr. 11

a. Tema. *Determinarea randamentului unui fierbător electric*

b. *Aparate şi materiale necesare.* Fierbător electric de 220 V, voltmetru electromagnetic 250V, ampermetru electromagnetic 5 A, cronometru, intreruptor, fire de legătură cu fişe, termometru.

c. *Principiul metodei.* Cu ajutorul fierbătorului se aduce la fierbere apa dintr-un vas. Se măsoară energia electrică consumată de fierbător în timpul încălzirii apei $W = UIt$, ca în lucrarea nr. 10, primul tabel de rezultate. Se determină apoi energia termică $Q = M \cdot \Delta\theta$ absorbită de vasul cu apă, pînă la fierberea apei, tot ca în lucrarea nr. 10, al doilea şi al treilea tabel de rezultate.

Se deduce apoi randamentul fierbătorului:

$$\eta = \frac{Q}{W}.$$

d. *Procedeu experimental.* Se realizează montajul din figura XV. Se cîntăresc, notînd masa m a vasului V, de căldură specifică c şi masa m_1 a apei de căldură specifică $c_1 = 4\,185{,}5 \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{grd}}$. Se introduce în apă fierbătorul F. Se citeşte la termometrul T temperatura iniţială a apei θ_0 şi timpul t_0 marcat de cronometru în momentul închiderii întreruptorului K, montajul fiind alimentat la prize electrice. Mişcînd încet fierbătorul în vasul cu apă — fără a-l scoate din apă — se citesc tensiunea U şi intensitatea I la instrumentele de măsurat. Cînd termometrul a atins $\theta = 100°C$ (apa începe să fiarbă) se citeşte timpul t_1 marcat de cronometru şi se întrerupe curentul electric.

e. *Tabele de rezultate.* Rezultatele obţinute se trec în tabelele 1 şi 2 din lucrarea nr. 10, ţinînd seamă că, în cazul de, faţă, $c_2 = 4\,185{,}5 \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{grd}}$.

Pentru energia termică şi randament se alcătuieşte tabelul care urmează:

M	θ_0	θ	$\Delta\theta = \theta - \theta_0$ grd	$Q = M \cdot \Delta\theta$ joule	$\eta = \frac{Q}{W}$	media

f. *Valorificarea rezultatelor obţinute.* Din tabelele 1 şi 2 se calculează energia electrică W şi capacitatea calorică M. Rezultatele din tabelul al treilea permit calcularea energiei termice absorbită de apă pînă la fierbere. Se deduce apoi randamentul $\eta < 1$.

• Lucrarea nr. 12

a. Tema. *Verificarea legilor electrolizei*

b. *Aparate şi materiale necesare.* Alimentator de 4—10 V, reostat cu cursor, întreruptor, cuvă electrolitică cu electrozi dreptunghiulari din cupru, cu dimensiunile 4 cm × 2,5 cm, cordoane de legătură cu fişe.

Scanned with OKEN Scanner

c. *Principiul metodei.* Se face electroliza $CuSO_4$, un timp determinat, cu un curent constant I și se măsoară cantitatea de Cu depusă la catod. Se folosește legea $m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} It$, unde $K = \frac{A}{nF}$ este constanta electrochimică a metalului, F este numărul lui Faraday, n este valența metalului, iar A este masa atomică a cuprului.

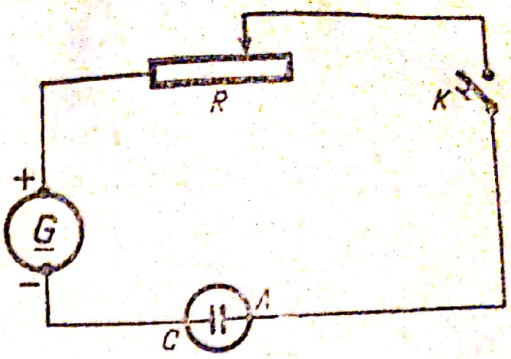


Fig. XVI.

d. *Procedeu experimental.* Se face montajul din fig. XVI.

Electrozii se freacă ușor cu glaspapir fin, se spală cu apă distilată, cu alcool și se usucă cu hîrtie de filtru fără a-i atinge cu mîna. Apoi se cîntăresc, notînd cu m'_A, m'_C, masele lor inițiale care se trec în tabelul de rezultate.

Se introduc cei doi electrozi în soluția de $CuSO_4$ din cuva electrolitică.

Se reglează foarte repede cursorul reostatului R, așa ca să circule un curent cu intensitatea $I = 0{,}5$ A.

Se închide apoi circuitul și se notează momentul inițial t_1, precum și valoarea I a intensității curentului.

Lăsăm să circule curentul electric circa 20 minute.

Se citește intensitatea curentului din minut în minut, și, dacă nu rămîne constantă, se aduce la valoarea ei inițială cu ajutorul reostatului.

Catodul			Anodul			Masa depusă la catod
la început	la sfîrșit	masa depusă	la început	la sfîrșit	masă pierdută	$m = \frac{m_A + m_C}{2}$
$m'_C = \ldots$	$m''_C = \ldots$	$m''_C - m'_C$	$m'_A = \ldots$	$m''_A = \ldots$	$m'_A - m''_A \ldots$	$m = \ldots$

Se întrerupe circuitul și se notează momentul t_2 al întreruperii. Se scot electrozii fără a-i atinge cu mîna, se clătesc cu apă distilată, cu alcool, și se usucă cu hîrtie de filtru fără a-i freca.

Se cîntărește repede și se notează în tabelul de rezultate masele lor finale m''_A și m''_C.

Anodul a pierdut din masa lui o cantitate:

$$m_A = m'_A - m''_A.$$

iar pe catod s-a depus o masă de cupru:

$$m_C = m''_C - m'_C.$$

Cele două mase trebuie să fie egale. Dacă prin cîntăriri cele două mase diferă puțin din cauza erorilor de măsurătoare, se poate lua media lor astfel încît masa de cupru m, transportată de la anod la catod în timpul electrolizei, va fi.

$$m = \frac{m_A + m_C}{2}$$

Durata electrolizei va fi:

$$t = t_2 - t_1.$$

Trecem aceste rezultate în tabelul următor și calculăm pe k

m	t_1	t_2	$t = t_2 - t_1$	I	$k = \frac{m}{It}$ grame/coulomb	Media

Se repetă operațiile și se face media.

Cu ajutorul acestei constante k se poate calcula constanta lui Faraday F, pe baza legii electrolizei:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}.$$

Se deduce astfel:

$$F = \frac{A}{k \cdot n} = \frac{63,6}{2 \cdot k} = \frac{31,8}{k} \cdot \frac{\text{coulombi}}{\text{echivalent-gram.}}.$$

• Lucrarea nr. 13

a. Tema. *Studierea t.c.e.m. la voltametru*

b. *Aparate și materiale necesare.* Două acumulatoare a 2 V fiecare, un voltametru, cu plăci de plumb, reostat de 50—100 Ω, întreruptor, voltmetru, cordoane cu fișe.

c. *Principiul metodei.* Se urmărește tensiunea la bornele unui voltametru în timpul electrolizei și se constată că ea scade cu timpul.

d. *Procedeu experimental.* Se face montajul din figura XVII. Electrozii voltametrului să fie curățați cu șmirghel, la început. Se conectează bornele RS ale voltmetrului la bornele OM ale acumulatorului, se închide întreruptorul și se citește tensiunea U. Se repetă operațiile pentru bornele ON ale celor două acumulatoare legate în serie și se citește tensiunea $2U$. Se repetă operația conectînd bornele RS ale voltmetrului la bornele OP și se citește repede tensiunea, se găsește tot $2U$. Imediat însă începe electroliza, iar tensiunea începe să scadă la o valoare $U' < 2U$. Se citesc valorile lui U' din 20 în 20 secunde pînă ce U' ajunge la o valoare constantă (cam după 2 minute). Din acest moment valoarea $Ep = 2U - U'$ rămîne constantă.

Conectîndu-se bornele RS ale voltmetrului la bornele NP ale voltametrului se constată că E este de sens opus tensiunii acumulatoarelor. Valorile numerice se trec într-un tabel de rezultate

e. *Tabel de rezultate*

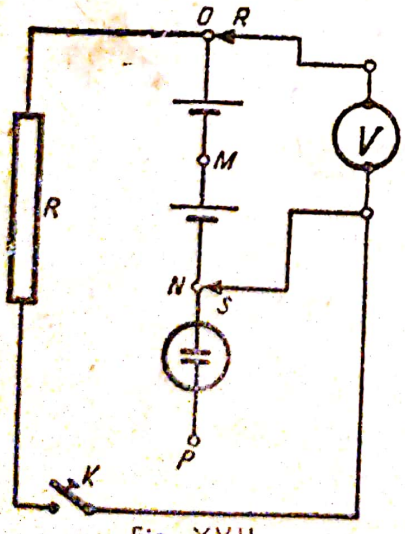


Fig. XVII.

Tensiunea		$Ep = 2U - U'$
la început	la sfîrșit	
bornele OM: $U =$		
bornele ON: $2U =$		
bornele OP: $2U =$	$U' =$	$Ep =$

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Măsurările arată că inițial voltametrul se comportă ca un simplu conductor. În cursul electrolizei însă electrozii lui se modifică, încît el devine generator. Tensiunea lui este valoarea finală a lui E, opusă tensiunii care a produs electroliza. Voltametrul s-a polarizat, a devenit sursă electrică, iar tensiunea lui se numește tensiune contraelectromotoare.

Scanned with OKEN Scanner

• Lucrarea nr. 14

a. Tema. *Cîmpul magnetic produs de curentul electric*

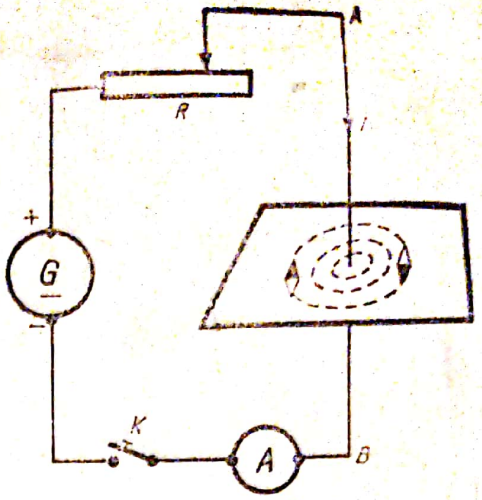


Fig. XVIII.

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator 2—10 V, sîrmă de cupru izolată, cu diametrul de 0,2—0,4 mm, bobină de 300 de spire, pilitură de fier, reostat de 30 Ω, ampermetru, întreruptor, busolă.

c. *Principiul metodei.* Pe un carton, prin care trece un conductor parcurs de curent electric, se presară pilitură de fier. Aceasta se așază de-a lungul liniilor de cîmp magnetic.

d. *Procedeu experimental.* 1. Firul de cupru *AB* (fig. XVIII) străbate normal cartonul. Cursorul reostatului se află la capătul de maximă rezistență electrică. Se închide întreruptorul și se deplasează cursorul spre capătul opus; rezistența circuitului scade și intensitatea crește. Se presară pilitură de fier pe carton și se ciocănește încet cu degetul. Curentul poate crește, pentru durată scurtă, la 4—5 A. Se observă liniile de cîmp. Un ac magnetic plimbat de-a lungul liniilor de cîmp pune în evidență direcția și sensul intensității cîmpului magnetic. Inversînd sensul curentului se inversează orientarea acului magnetic.

Cîmpuri intense se pot obține astfel. Se face cadru de 10 fire de cupru izolate, înfășurate cu ață ca să nu se desprindă unul de altul (fig. XIX). Cadrul să aibă laturile de 15—20 cm. În locul firului *AB* (fig. XVIII) se intercalează cadrul, avînd o latură care să treacă prin mijlocul cartonului. Un curent de trei amperi produce în cadru un efect magnetic de 10 ori mai intens. Se repetă experiențele precedente.

2. Se deformează cadrul și se aduce la forma unui dreptunghi cu latura mică de 3—4 cm și se repetă experiența precedentă (fig. XX).

3. Aceeași experiență se repetă cu o bobină de circa 300 de spire. Bornele bobinei se leagă a punctele *A* și *B* ale montajului (fig. XVIII).

e. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Din experiența 1 se constată că liniile cîmpului magnetic înconjură conductorul parcurs de curent, deci sînt linii închise. Acul magnetic are orientare bine determinată: direcția tangentă la linia de cîmp, sensul legat de sensul curentului prin regula burghiului drept. Sensul cîmpului magnetic depinde de sensul curentului electric.

Experiența a doua duce la aceleași concluzii. În plus arată că nu numai liniile cîmpului magnetic înconjură curentul electric, ci și acesta înconjură liniile de cîmp: curentul electric și

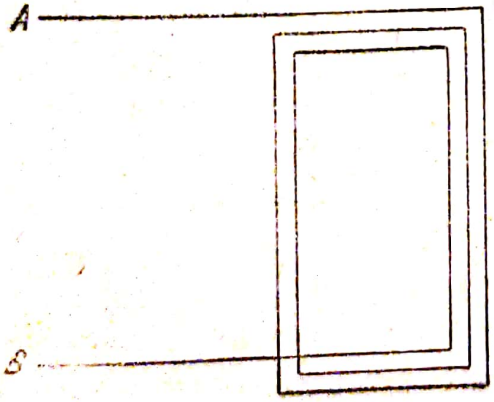


Fig. XIX.

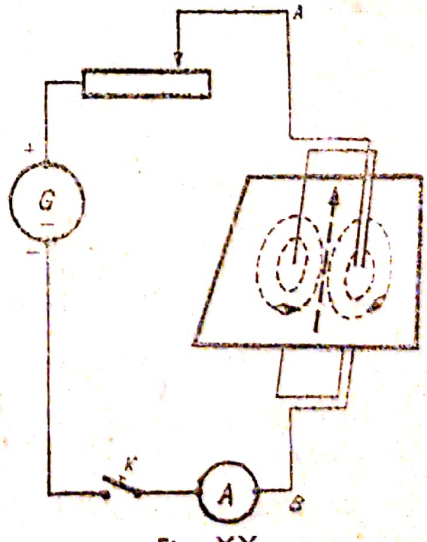


Fig. XX.

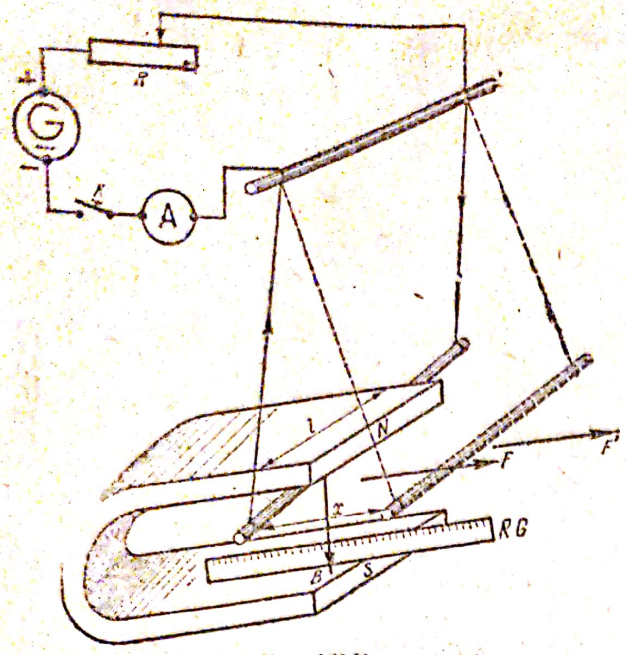


Fig. XXI.

liniile de cîmp magnetic produs de el sînt înlănțuite. Liniile de cîmp intră pe o față a spirei (cadrului) — fața sud — și ies prin cealaltă față — fața nord.

A treia experiență confirmă pe cele două anterioare și mai arată că în interiorul bobinei ia naștere un cîmp magnetic uniform.

• Lucrarea nr. 15

a. Tema. *Studiul forței electromagnetice*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de 4—10 V, reostat cu cursor R, întreruptor K, conductor de cupru lung de circa 30—40 cm, fire de cupru foarte subțiri, doi magneți potcoavă (dacă se poate identici), cordoane cu fișe pentru legături, stativ Bunsen cu suport, bară orizontală S, riglă gradată RG fixată pe suport, ampermetru.

c. *Principiul metodei.* Un conductor rectiliniu este suspendat pe un suport S prin două sîrme foarte subțiri, lungi de 60—80 cm. Conductorul este așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic uniform, de inducție B (fig. XXI), produs de un magnet potcoavă puternic. Trecînd un curent I prin conductorul mobil, cîmpul său magnetic interacționează cu cîmpul magnetic al magnetului și ia naștere forța electromagnetică $F = BIl$, unde l este porțiunea din conductorul mobil aflat în cîmpul magnetic produs de magnet.

d. *Procedeul experimental.* 1. Se realizează dispozitivul din figura XXI. Se reglează intensitatea la o anumită valoare, cu ajutorul reostatului R: conductorul mobil este deplasat lateral cu o forță F, inversînd sensul curentului, se inversează sensul forței electromagnetice F. Inversînd magnetul — fața S în sus — adică inversînd sensul cîmpului magnetic, se inversează, de asemenea, sensul forței electromagnetice.

2. Se fixează orizontal, fără a atinge conductorul în timpul mișcării, o riglă gradată în milimetri RG. Se repetă experiența pentru valori 1A, 2A, 3A, 4A ale curentului, măsurîndu-se de fiecare dată deviația x_1, x_2, x_3, x_4.

3. Se repetă operațiile de la punctul 2, așezînd al doilea magnet paralel cu primul și cu polii identici alăturați. De data aceasta l are valoare dublă, iar B rămîne același. Se măsoară deviația care corespunde unui curent, de exemplu, de 4A.

e. *Tabele de rezultate.* Rezultatele se trec în următorul tabel de rezultate:

	l m	I A	x m	$F = kx$	$\frac{kx}{l}$	$B = \frac{kx}{Il}$	media
un magnet							
doi magneți							

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Prima experiență arată că forța electromagnetică F, curentul I și inducția magnetică B formează un triedru drept. Sensul ei depinde de sensul curentului și de sensul inducției magnetice.

A doua experiență permite să deducem dependența forței electromagnetice de intensitatea curentului, lungimea activă l a conductorului și inducția B rămînînd aceleași. Forța electromagnetică este proporțională cu deplasarea x, firele de suspensie fiind lungi $F = kx$. Se constată că $F \sim I$. Se calculează apoi B.

În experiența a treia se constată dependența forței electromagnetice de lungimea conductorului aflată în cîmpul magnetic, I și B rămînînd aceleași. Se găsește că raportul $\frac{kx_1}{l} = \frac{kx_2}{2l} =$ = const, deci forța electromagnetică este proporțională cu lungimea conductorului $F \sim l$. Se poate determina valoarea inducției magnetice $B = \frac{kx_2}{Il}$, în unități convenționale.

Scanned with OKEN Scanner

• Lucrarea nr. 16

a. Tema. *Acțiunea reciprocă a conductoarelor parcurse de curent electric*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de 6—10 V, ampermetru, reostat cu cursor, cadru de lemn cu fire foarte subțiri de cupru (fig. XXII), întreruptor, stativ Bunsen, cordoane de legătură cu fișe.

c. *Procedeu experimental.* Cadrul de lemn este lung de 50 cm, iar firele de cupru, întinse de cîte un resort slab r și r' (fig. XXII) sînt distanțate cu 10—12 mm. El este fixat de un stativ Bunsen. Bornele B_1 și B'_1 se leagă la un pol al alimentatorului, bornele B_2 și B'_2 la celălalt. Se reglează intensitatea la valoarea maximă suportată de alimentator. La închiderea de durată scurtă a întreruptorului K cele două fire paralele se atrag. Se repetă de cîteva ori.

2. Se întrerupe legătura la borna B'_1 rămînînd numai la B_1. Capătul sîrmei care pornește de la întreruptor se leagă la borna B'_1. Bornele B'_2 și B_1 se leagă împreună. Se reglează curentul la valoarea maximă permisă de sursă. La închiderea de scurtă durată a întreruptorului K, cele două fire parcurse de curent se resping. Se repetă de cîteva ori.

d. *Valorificarea rezultatelor obținute.* În prima experiență conductoarele erau parcurse de curenți de același sens și se atrăgeau. În a doua experiență conductoarele erau parcurse de curenți de sens contrar și se respingeau. Să se facă schema celei de-a doua experiențe. Care este cauza acestor interacțiuni?

• Lucrarea nr. 17

a. Tema. *Studiul tensiunii electromotoare de inducție*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de 4 V, transformator școlar I.M.D. avînd primarul cu două înfășurări: AB pentru 4 V și AC pentru 8 V, reostat cu cursor, întreruptor, miliampermetru, fire de legătură cu fișe.

c. *Procedeu experimental.* 1. Se face montajul din figura XXIII. Se scoate bara de fier divizat, care închide circuitul magnetic al transformatorului. Bornele sursei sînt conectate la bornele AC ale transformatorului. Se închide întreruptorul K: se notează ce se observă la acul miliampermetrului. Se deschide întreruptorul: se notează ce se observă la acul galvanometrului.

2. Se repetă experiența după același procedeu, însă punînd al locul ei bara prismatică din fier divizat, adică se închide circuitul magnetic al miezului transformatorului. Se fac notațiile corespunzătoare.

3. Se scoate iar bara prismatică din fier divizat (dacă curentul indus e prea intens) și se deplasează cursorul reostatului R către stînga. Se notează ce se observă la acul galvanometrului.

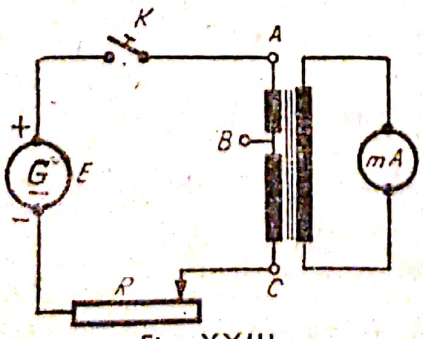


Fig XXIII.

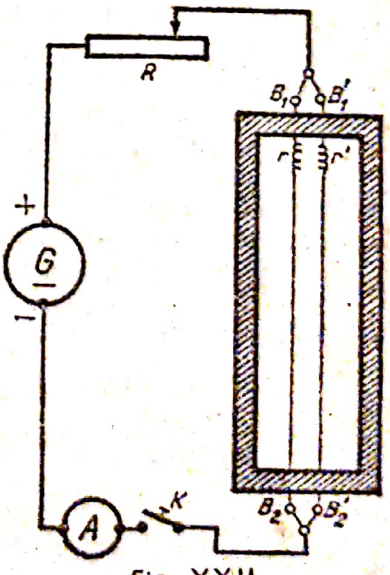


Fig. XXII.

Se deplasează apoi cursorul spre dreapta și se notează ce se observă la acul galvanometrului. Se repetă aceleași două operații anterioare de la punctul trei, dar cu viteză mai mare. Se fac notațiile corespunzătoare.

d. *Tabel de rezultate.* Rezultatele se trec în tabelul care urmează

e. *Valorificarea rezultatelor.* La care operație din experiența 1 este mai mare deviația de t.e.m. indusă? Se constată deosebire între sensuri și în cele 2 cazuri?

	Operația	Ce se observă	Concluzii	
			asupra mărimii	asupra sensului
Exp. 1	la închidere	Acul deviază spre... și apoi		
	la deschidere			
Exp. 2	la închidere			
	la deschidere			
Exp. 3	la creșterea lui *i*			
	la scăderea lui *i*			
	creșterea lui *i* cu viteză mare			
	scăderea lui *i* cu viteză mare			

Aceleași întrebări pentru experiența a doua. Ce deosebire este între mărimea t.e.m. induse în cazul experienței a doua și cea indusă în cazul experienței 1? Care este cauza? E deosebire între fluxul de inducție din miezul de fier în cele două experiențe? Așadar, de cine depinde mărimea t.e.m. induse?

Prima parte a experienței 3 confirmă concluzia? În ce fel? Să se compare mărimea t.e.m. indusă în cazurile 1 și 3, precum și a celei induse în cazurile 2 și 4, deci experiența a treia. Ce se constată? De cine mai depinde mărimea t.e.m. induse?

Observînd sensurile t.e.m. induse în fiecare caz din cele trei experiențe, ce concluzie se scoate?

• Lucrarea nr. 18

a. Tema. *Inducția electromagnetică în conductoare masive*

b. *Aparate și materiale necesare.* Bobină de 1 200 spire, bară de fier, cordoane cu fișe de legătură, aparat pentru producerea curenților Foucault, tip I.M.D.

c. *Principiul metodei.* Se mișcă conductoare masive, apoi și conductoare divizate în cîmp magnetic: în primul caz se produc curenți intenși, în al doilea foarte slabi.

d. *Procedeu experimental.* 1. Se folosește aparatul pentru producerea curenților Foucault construit de I.M.D. Se lasă piesa mobilă să penduleze cu partea plină între armăturile electromagneților: e frînată brusc.

2. Se repetă experiența, potrivind ca piesa mobilă să penduleze cu partea crestată printre armăturile electromagneților: e frînată foarte încet.

3. Se introduce o bară de fier masivă într-o bobină de 1 200 spire, pe care o conectăm la rețeaua de 220 V, 50 Hz. Se constată că după foarte puțin timp se încălzește.

e. *Valorificarea rezultatelor obținute.* De ce se produce frînarea bruscă a piesei masive, în prima experiență?

De ce frînarea piesei crestate se produce încet în a doua experiență?

Cum se explică încălzirea barei de fier în experiența a treia?

• Lucrarea nr. 19

a. Tema. *Determinarea inducției proprii la o bobină*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator 4 V alternativ și continuu, potențiometru 300 Ω, voltmetru electromagnetic, ampermetru electromagnetic, întreruptor, bobină de 600 spire, miez de fier divizat (de la transformator), fire de legătură cu fișe.

Scanned with OKEN Scanner

Se deplasează apoi cursorul spre dreapta și se notează ce se observă la acul galvanometrului. Se repetă aceleași două operații anterioare de la punctul trei, dar cu viteză mai mare. Se fac notațiile corespunzătoare.

d. *Tabel de rezultate.* Rezultatele se trec în tabelul care urmează

e. *Valorificarea rezultatelor.* La care operație din experiența 1 este mai mare deviația de t.e.m. indusă? Se constată deosebire între sensuri și în cele 2 cazuri?

	Operația	Ce se observă	Concluzii	
			asupra mărimii	asupra sensului
Exp. 1	la închidere	Acul deviază spre... și apoi		
	la deschidere			
Exp. 2	la închidere			
	la deschidere			
Exp. 3	la creșterea lui i			
	la scăderea lui i			
	creșterea lui i cu viteză mare			
	scăderea lui i cu viteză mare			

Aceleași întrebări pentru experiența a doua. Ce deosebire este între mărimea t.e.m. induse în cazul experienței a doua și cea indusă în cazul experienței 1? Care este cauza? E deosebire între fluxul de inducție din miezul de fier în cele două experiențe? Așadar, de cine depinde mărimea t.e.m. indusă?

Prima parte a experienței 3 confirmă concluzia? În ce fel? Să se compare mărimea t.e.m. indusă în cazurile 1 și 3, precum și a celei induse în cazurile 2 și 4, deci experiența a treia. Ce se constată? De cine mai depinde mărimea t.e.m. indusă?

Observînd sensurile t.e.m. induse în fiecare caz din cele trei experiențe, ce concluzie se scoate?

• Lucrarea nr. 18

a. Tema. *Inducția electromagnetică în conductoare masive*

b. *Aparate și materiale necesare.* Bobină de 1 200 spire, bară de fier, cordoane cu fișe de legătură, aparat pentru producerea curenților Foucault, tip I.M.D.

c. *Principiul metodei.* Se mișcă conductoare masive, apoi și conductoare divizate în cîmp magnetic: în primul caz se produc curenți intenși, în al doilea foarte slabi.

d. *Procedeu experimental.* 1. Se folosește aparatul pentru producerea curenților Foucault construit de I.M.D. Se lasă piesa mobilă să penduleze cu partea plină între armăturile electromagneților: e frînată brusc.

2. Se repetă experiența, potrivind ca piesa mobilă să penduleze cu partea crestată printre armăturile electromagneților: e frînată foarte încet.

3. Se introduce o bară de fier masivă într-o bobină de 1 200 spire, pe care o conectăm la rețeaua de 220 V, 50 Hz. Se constată că după foarte puțin timp se încălzește.

e. *Valorificarea rezultatelor obținute.* De ce se produce frînarea bruscă a piesei masive, în prima experiență?

De ce frînarea piesei crestate se produce încet în a doua experiență?

Cum se explică încălzirea barei de fier în experiența a treia?

• Lucrarea nr. 19

a. Tema. *Determinarea inducției proprii la o bobină*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator 4 V alternativ și continuu, potențiometru 300 Ω, voltmetru electromagnetic, ampermetru electromagnetic, întreruptor, bobină de 600 spire, miez de fier divizat (de la transformator), fire de legătură cu fișe.

Scanned with OKEN Scanner

c. *Principiul metodei.* Se determină rezistența R a bobinei din U și I în curent continuu $R = \frac{U}{I}$. Apoi se determină impedanța Z a bobinei din U_1 și I_1 în curent alternativ $Z = \frac{U_1}{I_1}$. Se deduce apoi inductanța proprie L:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi\nu}.$$

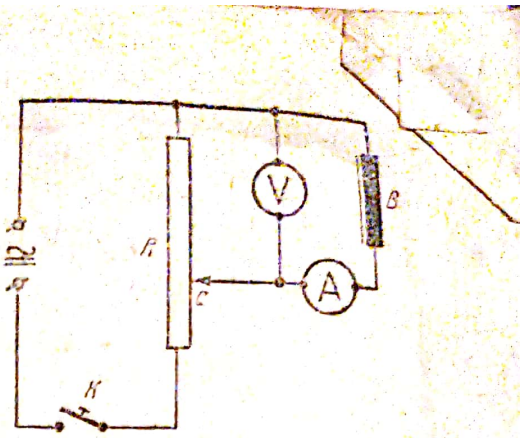


Fig. XXIV

d. *Procedeu experimental.* Se realizează montajul din figura XXIV, cu bobina B de 600 spire alimentată potențiometric mai întîi în curent continuu. Se reglează tensiunea la bornele bobinei la $U = 2V$, citită la voltmetru V și se citește intensitatea I la ampermetrul A. Se reglează apoi tensiunea la 1 V și se citește intensitatea corespunzătoare, trecîndu-se în tabelul de rezultate.

Se fac aceleași operații, înlocuindu-se tensiunea continuă prin tensiune alternativă și se trec rezultatele în tabele.

Apoi se introduce bobina pe o ramură a unui miez de transformator, cu circuit magnetic închis. Se refac cele două măsurări în curent continuu și cele două măsurări în curent alternativ.

e. *Tabel de rezultate*

N spire		în curent =			în curent ~ 50 Hz				Media
		U	I	$R = \frac{U}{I}$	U_1	I_1	$Z = \frac{U_1}{I_1}$	$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi\nu}$	
fără miez	600	2			2				
		1			1				
cu miez	600	2			2				
		1			1				

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Cum sînt valorile lui R în cele două cazuri? Ce deduceți de aici?

Cum sînt valorile lui L în cele două cazuri? Ce deduceți de aici?

• Lucrarea nr. 20

a. Tema. *Studiul calitativ al impendanței în circuitul de curent alternativ*

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentator de curent continuu și curent alternativ 4—10 V, ampermetru electromagnetic, rezistență potențiometrică R, întreruptor K, bec L de 6 V, bobină de 1 200 spire, miez de transformator I.M.D., fire de legătură cu fișe, trei condensatoare a 4μF, manipulator Morse M.

c. *Procedeu experimental.* 1. Se face montajul din figura XXV. Cu ajutorul potențiometrului se reglează tensiunea așa ca becul L să lumineze puternic. Se deplasează miezul M care închide circuitul magnetic, pînă la îndepărtarea lui totală și se observă cum luminează becul. Se scoate bobina de pe miezul de fier și, de asemenea, se observă lumina becului.

2. Se înlocuiește curentul continuu prin cel alternativ. Se reglează tensiunea cu ajutorul potențiometrului, miezul M fiind îndepărtat complet, pînă ce becul luminează bine: se aplică M și se deplasează pînă la închiderea completă a circuitului magnetic. Se observă cum luminează becul în acest timp. Rezultatele se trec în primul tabel.

3. Se realizează montajul din figura XXVI. Se apasă pe manipulatorul M: se închide circuitul în 1 și se deschide în 2. Ce se constată la becul L? Se eliberează manipulatorul M: se întrerupe circuitul în 1 și se închide în 2. Se observă ce se întîmplă la becul L.

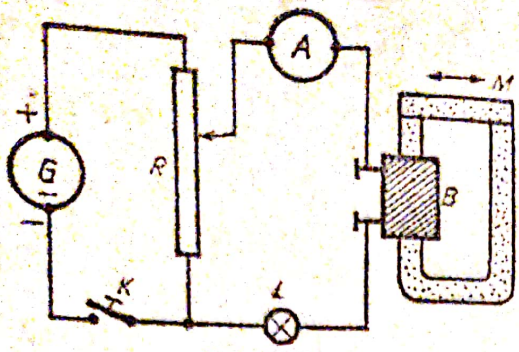


Fig. XXV.

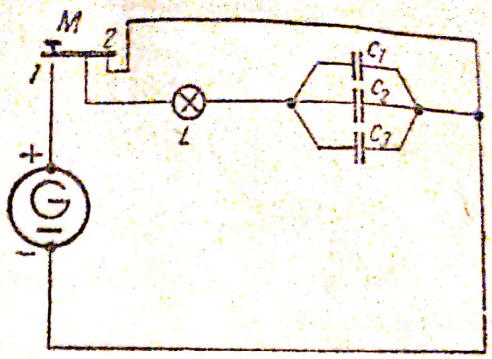


Fig. XXVI.

4. Se înlocuiește curentul continuu prin cel alternativ. Se apasă pe manipulator și se observă ce se petrece la becul *L*. Se scoate din montaj un condensator, apoi doi și se repetă de fiecare dată apăsarea pe manipulator. Se notează în tabelul al doilea observațiile.

d. *Tabele de rezultate*

Pentru bobină

Felul tensiunii	Circuitul magnetic	Cum luminează becul	Impedanța	Concluzii
continuă	închis	puternic	mică	
	se deschide treptat	puternic	mică	Curentul continuu nu influențează impedanța
	fără miez	puternic	mică	Nu influențează bobina
alternativă	deschis	puternic	mică	Impedanța crește cînd inductanța crește
	se închide treptat			

Pentru condensator

Felul tensiunii	Circuitul magnetic	Cum luminează becul	Impedanța	Concluzii
continuă	se închide	luminează un scurt moment	foarte mare	Se stabilește un curent electric numai la încărcarea și descărcarea condensatorului
	se deschide	luminează un scurt moment	foarte mare	
alternativă	se închide prin 3 condensatoare în paralel	luminează întrerupt	foarte mică	Impedanța crește cînd capacitatea scade
	se închide prin 2 condensatoare în paralel	luminează neîntrerupt, ceva mai slab	crește	
	se închide prin 1 condensator	luminează foarte slab sau deloc	foarte mare	

e. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Se controlează observațiile notate în tabele. Se justifică concluziile.

Scanned with OKEN Scanner

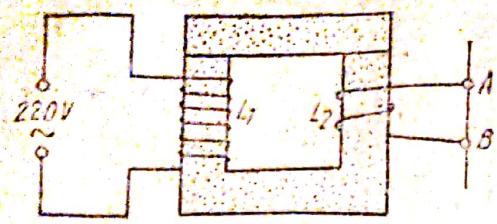


Fig. XXVII.

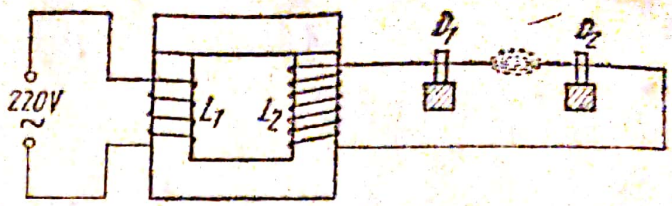


Fig. XXVIII.

• Lucrarea nr. 21

a. Tema. *Folosirea transformatoarelor*

b. *Aparate și materiale necesare.* Bobine de 600 spire, 3 spire, 1 200 de spire, miez de transformator I.M.D., cui de fier, fire de legătură cu fișe, 2 picioare izolatoare D_1 și D_2.

c. *Procedeu experimental.* 1. Transformator coborîtor de tensiune. Se realizează montajul din figura XXVII: L_1 este o bobină de 600 spire, L_2 alta de 3—4 spire. Între bornele AB se fixează un cui de fier cu diametrul 3—4 mm. Bobina L_1 se conectează la rețeaua de 110 V sau 220 V; 50 Hz. Să se observe ce se întîmplă cu cuiul după conectare la rețea.

2. Transformator ridicător de tensiune. Se face montajul din figura XXVIII. Bobina L_1 are 600 de spire, iar L_2 are 1 200 de spire. Bobina L_1 se conectează la rețeaua de 220 V, 50 Hz. Reglînd distanța dintre vîrfurile sîrmelor fixate pe picioarele izolatoare, se obțin, între vîrfurile aflate la distanța de 0,5—1 mm, scîntei electrice. Ce se poate spune despre tensiunea la secundar?

d. *Valorificarea rezultatelor obținute.* De ce se topește cuiul din prima experiență? Cum este intensitatea curentului electric care îl străbate? Dar tensiunea? La ce se poate folosi un asemenea montaj?

De ce se produc scîntei electrice în cazul experienței a doua? Cum este tensiunea la secundar? La ce se poate folosi un asemenea montaj?

• Lucrarea nr. 22

Trasarea caracteristicii de grilă a unei triode

Aparate și materiale necesare. Se folosește următoarea aparatură: alimentator de curent continuu și alternativ, voltmetru 0—250 V (cc.), miliampermetru 0—200 mA (c.c.), voltmetru 0—10 V (c.a.).

Din trusa pentru experiențe de electronică I.M.D., se mai utilizează: suportul stativ, placa de bază, planșa cu schema șablon nr. V, suportul cu tub electronic, potențiometrul radio de 0,5 MΩ, rezistența reglabilă de 15 Ω, contactul — scurtcircuit, conexiunile cu banane.

Principiul metodei. Se reprezintă grafic variația curentului anodic al unei triode, în funcție de tensiunea grilei, cînd tensiunea anodică se menține constantă; această curbă se numește *caracteristica de grilă a unei triode* (vezi § 10.5).

Procedeu experimental. Se realizează montajul arătat pe planșa cu schema șablon nr. VI (fig. XXIX).

Se pune întrerupătorul lateral al suportului pentodei pe poziția T astfel ca aceasta să funcționeze ca triodă.

Se alimentează filamentul cu 6,3 V c.a. și se aplică anodului o tensiune de 50 V c.c.; se mențin aceste tensiuni (U_f, U_a) constante pentru o serie de experiențe.

Cu ajutorul potențiometrului se variază tensiunea de grilă U_g din volt în volt, de la zero pînă la valoarea care anulează curentul anodic I_a.

Se citește U_g la voltmetrul V și intensitatea anodică la miliampermetru mA. Datele culese se trec în *tabelul de rezultate*:

Nr. experienței	U_1(V)		U_2(V)	
	Ug(V)	I_a(mA)	U_g(V)	I_a(mA)

Scanned with OKEN Scanner

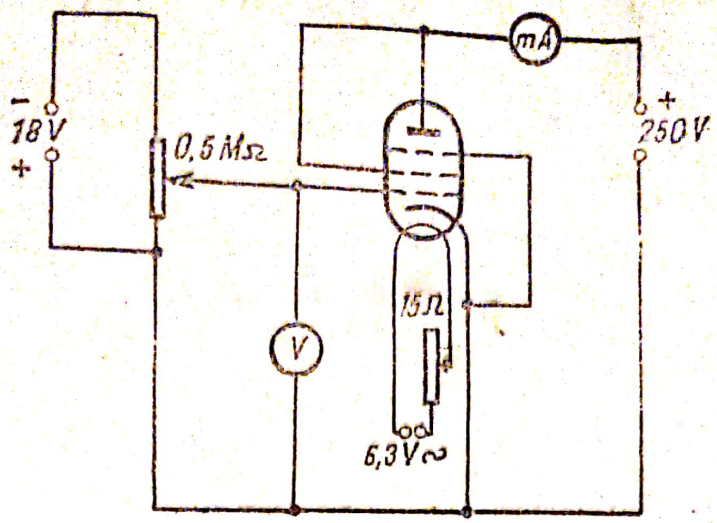


Fig. XXIX.

Valorificarea rezultatelor. Cu datele obținute se trasează caracteristica de grilă a triodei. Se mărește tensiunea plăcii la 75 V și se face a doua serie de măsurători reprezentîndu-se rezultatele pe același grafic (v. fig. 10.12).

Observație. La tensiunea de grilă zero, trioda se comportă ca o diodă.

• Lucrarea nr. 23

Producerea microundelor întreținute și determinarea lungimii de undă

Aparate și materiale necesare. Alimentator de curent continuu și alternativ, aparatul I.M.D pentru producerea și studiul undelor electromagnetice de înaltă frecvență (microundelor), din care folosim următoarele piese:

1. *Generatorul de microunde* (fig. XXX) ce constă dintr-o triodă *ECC*85, un circuit oscilant format dintr-o singură spiră S_1 și un condensator de 100 pF. Negativarea grilei se face printr-o rezistență de 500 Ω.

2. *Spira de încercare S* ce constă dintr-o spiră de aceeași rază cu spira S_1 și pusă în serie cu un bec de 3,5 V/0,2 A.

3. *Spira de cuplaj S_2 cu linie bifilară L și L'* ce constă dintr-o spiră S_2, de aceeași rază cu spira S_1, de la capetele căreia se întind două sîrme de cupru neizolate și paralele L și L'.

4. *Scurtcircuitorul S_c* ce este format dintr-un suport pe care se află montată o lamă metalică.

5. *Detectorul de ventre și de noduri de curent D* ce constă dintr-un suport la fel ca cel de la scurtcircuitor, dar prevăzut cu un bec de 3,5 V/0,2 A.

Principiul metodei. Vezi § 12.5. Obținerea oscilațiilor întreținute într-un circuit oscilant conectat în circuitul anodic al unei triodei și § 12.9, producerea undelor electromagnetice.

Procedeu experimental.

a) *Producerea microundelor*

Se aplică, de la alimentatorul didactic, filamentului triodei o tensiune de 6,3 V (c.a.) și anodului o tensiune de 200V (c.c.).

Se așază spira de încercare, paralel cu spira S_1 și la cîțiva centimetri de ea; după 2—3 minute observăm că becul se aprinde, ceea ce dovedește că în circuitul oscilant au luat naștere oscilații electromagnetice, care s-au transmis prin inducție în spira de încercare.

b) *Determinarea lungimii de undă*

Se așază la 3—4 mm de spira S_1 și paralel cu ea, spira de cuplaj cu linie bifilară.

Punem detectorul de ventre și de noduri de curent la capătul dinspre triodă al liniei bifilare, iar scurtcircuitorul la celălalt capăt al liniei.

Se deplasează apoi scurtcircuitorul pînă cînd becul detectorului are maximum de luminozitate.

În această situație, linia bifilară este acordată pe frecvența generatorului de microunde, iar de-a lungul liniei bifilare se formează unde electromagnetice staționare.

Se observă apariția nodurilor și ventrelor de curent, lăsînd scurtcircuitorul în poziția inițială și deplasînd detectorul pe linia bifilară; luminozitatea becului devine maximă la ventre și minimă la noduri.

Scanned with OKEN Scanner

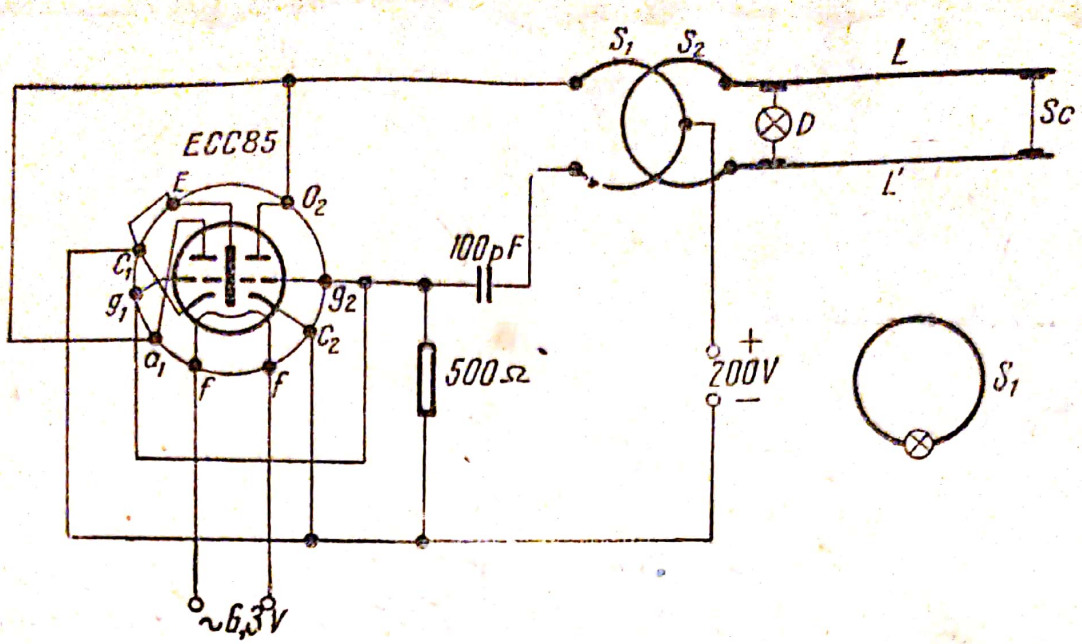


Fig. XXX.

Măsurînd distanţa dintre două noduri sau două ventre consecutive, care se află la $\lambda/2$, se calculează lungimea de undă λ. Din formula $\nu = c/\lambda$, calculăm frecvenţa, unde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Repetăm experienţa şi calculăm media valorilor pentru λ şi ν. Datele obţinute le trecem în *tabelul de rezultate*:

Nr. exp.	$\lambda/2$ (m)	λ (m)	ν (Hz)	Media pentru λ	Media pentru ν

Observaţie

Deoarece alimentarea anodică se face la tensiunea de 200 V, se interzice atingerea spirei S_1.

• Lucrarea nr. 24

Funcţionarea triodei ca detectoare şi amplificatoare (Receptor cu detecţie pe grilă)

Denumirea pieselor necesare	Nr. de ordine al piesei
Suportul stativ	1—2—4—56
Placă de bază	66
Suportul cu tub electronic	15
Planşa cu schema şablon	XI
Bobină cu 100 spire	53
Condensator variabil cu aer 500pF	16
Rezistenţă ohmică 1 MΩ	30
Contact scurtcircuit	23
Condensator 100 pF	35
Antenă recepţie	65
Cablu pentru legătură cu pămîntul	
Difuzor	68

Aparate şi materiale necesare. Alimentator de curent continuu şi alternativ, truse pentru experienţe de electrotehnică din care folosim pe cele din tabelul alăturat.

Principiul metodei. Vezi § 10.9. Trioda funcţionează în acelaşi timp ca detectoare şi ca amplificatoare. Oscilaţiile electromagnetice recepţionate în circuitul antenei trec în circuitul grilei şi dau în circuitul anodic un curent detectat şi amplificat, care este pus în evidenţă cu ajutorul unui difuzor.

Procedeu experimental. Realizăm montajul indicat în schema şablon nr. XI (fig. XXXI).

Se montează antena radio din trusă şi se leagă receptorul la pămînt.

Se alimentează filamentul triodei cu 6,3 V (c.a.) şi circuitul anodic cu 250 V (c.c.).

* Numerele de ordine se referă la trusele produse de I.M.D., din anul 1962.

Scanned with OKEN Scanner

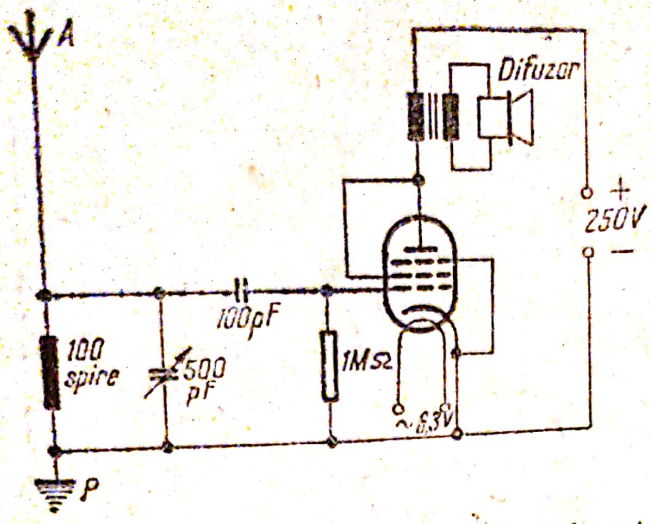


Fig. XXXI.

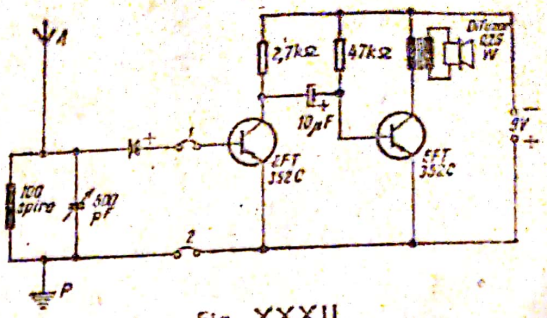


Fig. XXXII.

Se acordă aparatul cu ajutorul condensatorului variabil; în difuzor obţinem o audiţie a postului recepţionat.

Explicarea obţinerii audiţiei este următoarea: Oscilaţiile de înaltă frecvenţă şimodulate ajung de la antenă, la circuitul oscilant, format din bobina de 100 de spire şi condensatorul variabil — care se acordă pe postul căutat — iar de aci prin al doilea condensator de 100 pF la grila triodei.

Grila este conectată la catod printr-o rezistenţă de 1 M Ω. În acest caz în circuitul anodic al triodei trec numai alternanţele care fac grila pozitivă, celelalte alternanţe sînt suprimate sau foarte mult atenuate. Deci oscilaţiile se demodulează şi se amplifică devenind oscilaţii de joasă frecvenţă, care se pun în evidenţă, de difuzor.

• Lucrarea nr. 25

Aparat de radiorecepţie cu tranzistori

Aparate şi materiale necesare. Trusa pentru experienţe cu semiconductoare, din care se foloseşte montajul de pe planşeta II, cuprinzînd un aparat de radiorecepţie cu o diodă semiconductoare şi montajul de pe planşeta III, cuprinzînd un amplificator în joasă frecvenţă, două baterii a 4,5 V, o antenă de recepţie, cablu pentru legătura cu pămîntul.

Principiul metodei. Vezi § 11.9 şi 11.11.

Procedeu experimental. Alăturăm planşetele II şi III şi se leagă la bornele 1 şi 2 prin punţile ce se găsesc în trusă, ieşirea detectorului *D* se leagă cu baza primului tranzistor, iar cealaltă bornă 2 se leagă la plusul alimentării de la planşeta III (fig. XXXII).

Se leagă antena şi priza de pămînt la bornele indicate cu *A* şi *P*.

Se alimentează aparatul cu 9 V (două baterii a 4,5 V) respectînd polaritatea indicată de fig. XXXII.

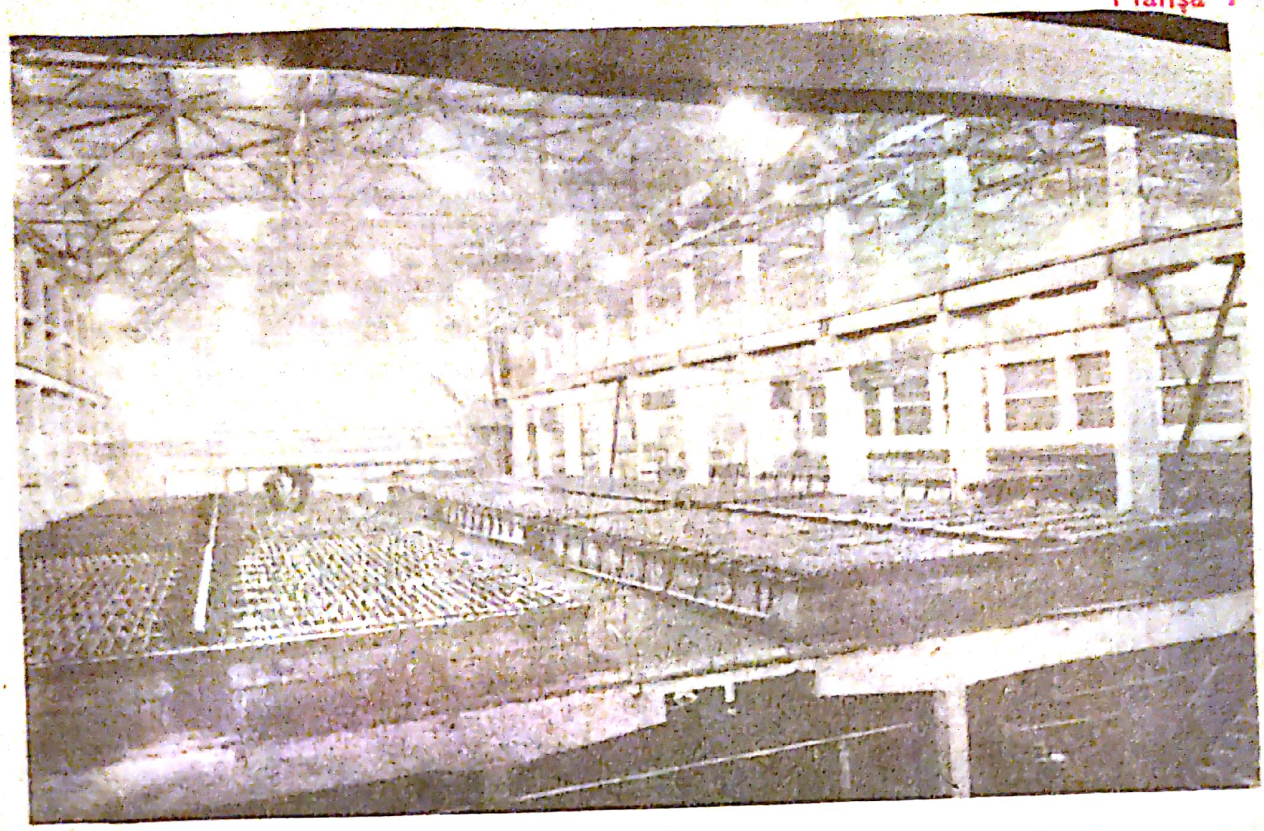
Se roteşte butonul condensatorului variabil şi se recepţionează în difuzor postul pe unde medii sau lungi, după bobina utilizată (trusa pentru experienţe cu semiconductoare are două bobine, pentru unde medii şi lungi).

Observaţii

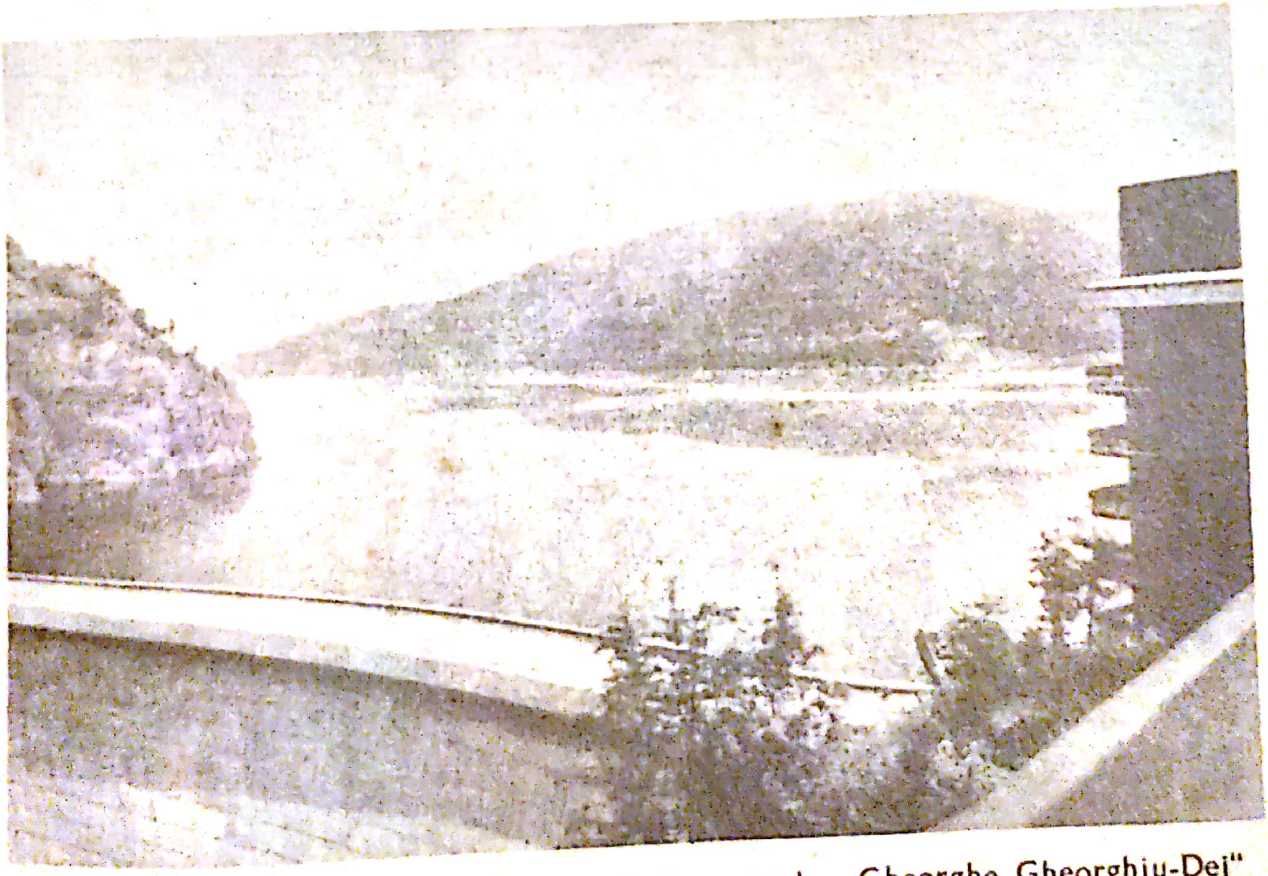
— În cazul că aparatul nu funcţionează se va inversa conectarea diodei la bornele respective (se scoate din borne şi se introduce invers).

Nr. colilor de tipar : 17
Tiraj : 39 850 ex.
Bun de tipar : 4.10.1974

Combinatul Poligrafic
„CASA SCÎNTEII"
Bucureşti — R.S.R.
Com. nr. 40 638/21 375

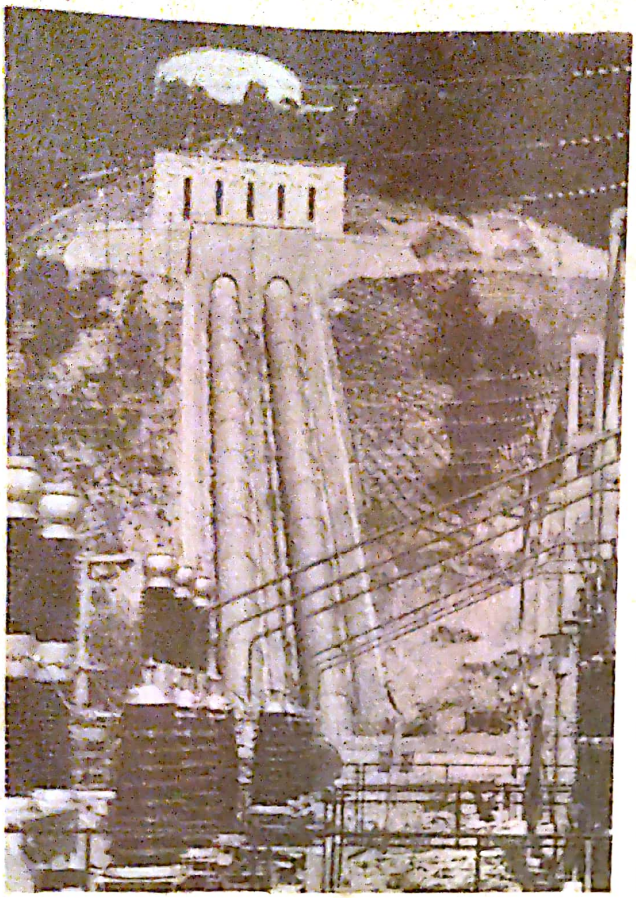


1. Sala cuvelor de electroliză la Combinatul Chimico-Metalurgic „Gheorghe Gheorghiu-Dej" din Baia Mare

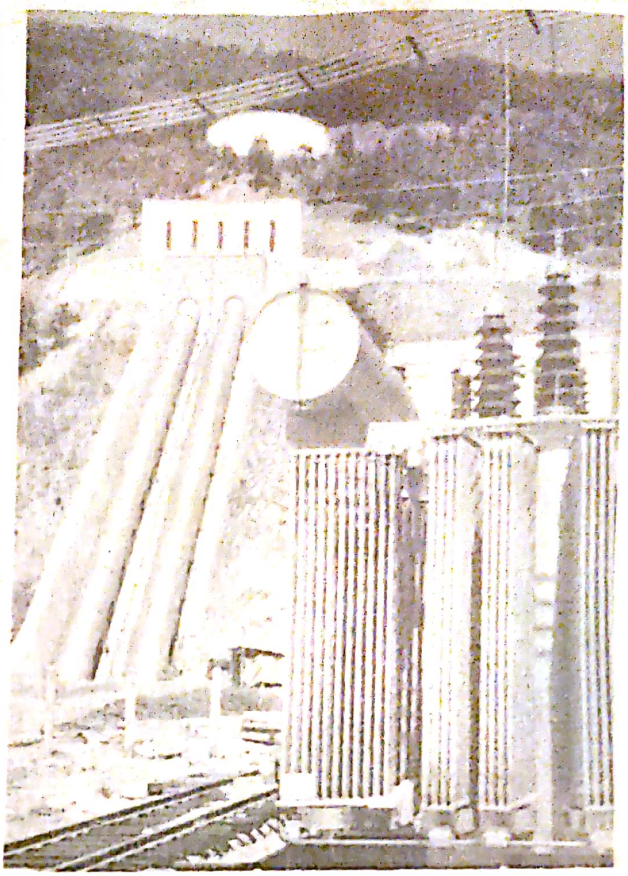


2. Barajul și lacul de acumulare la hidrocentrala „Gheorghe Gheorghiu-Dej" de pe Argeș.

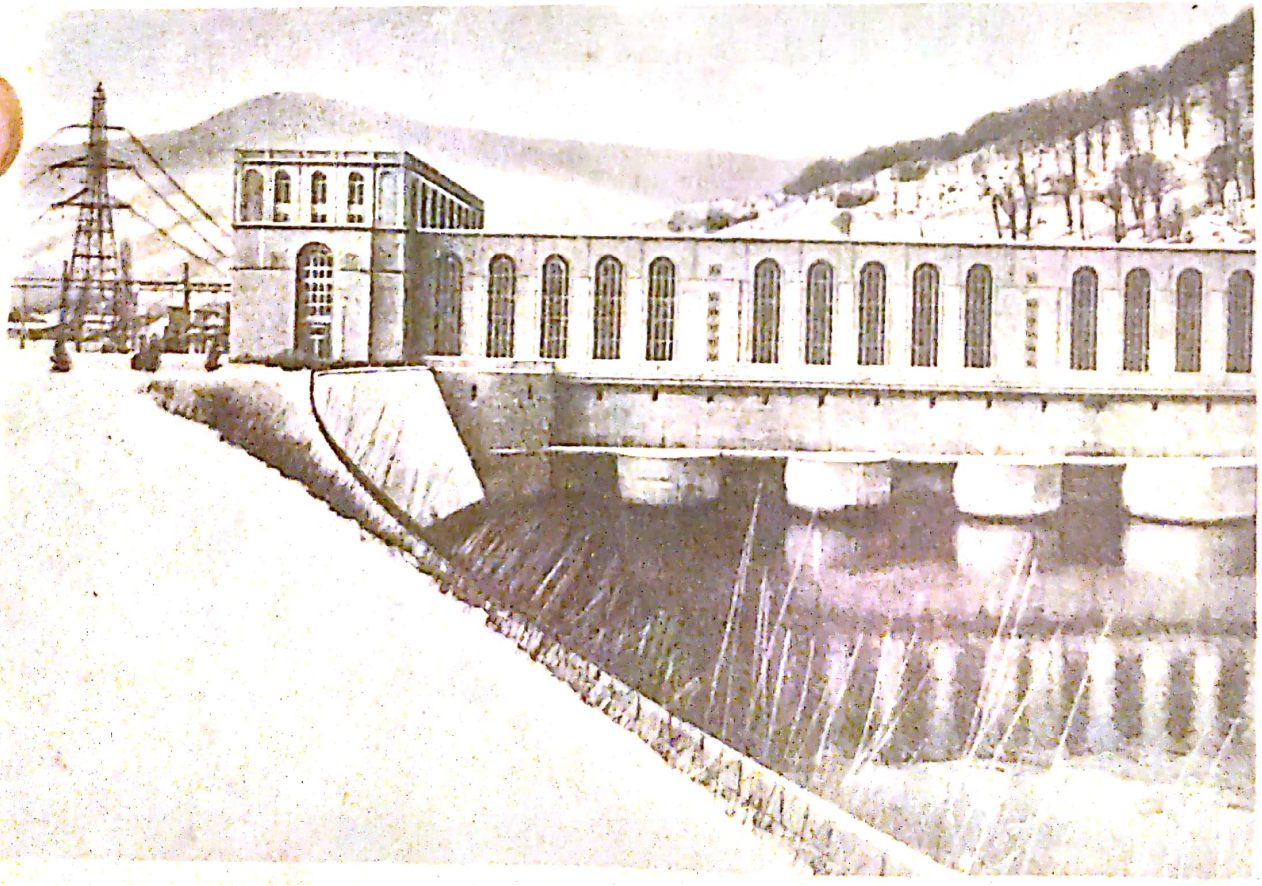
Scanned with OKEN Scanner



3. Conducte forțate la hidrocentrala „V. I. Lenin" de la Stejaru.

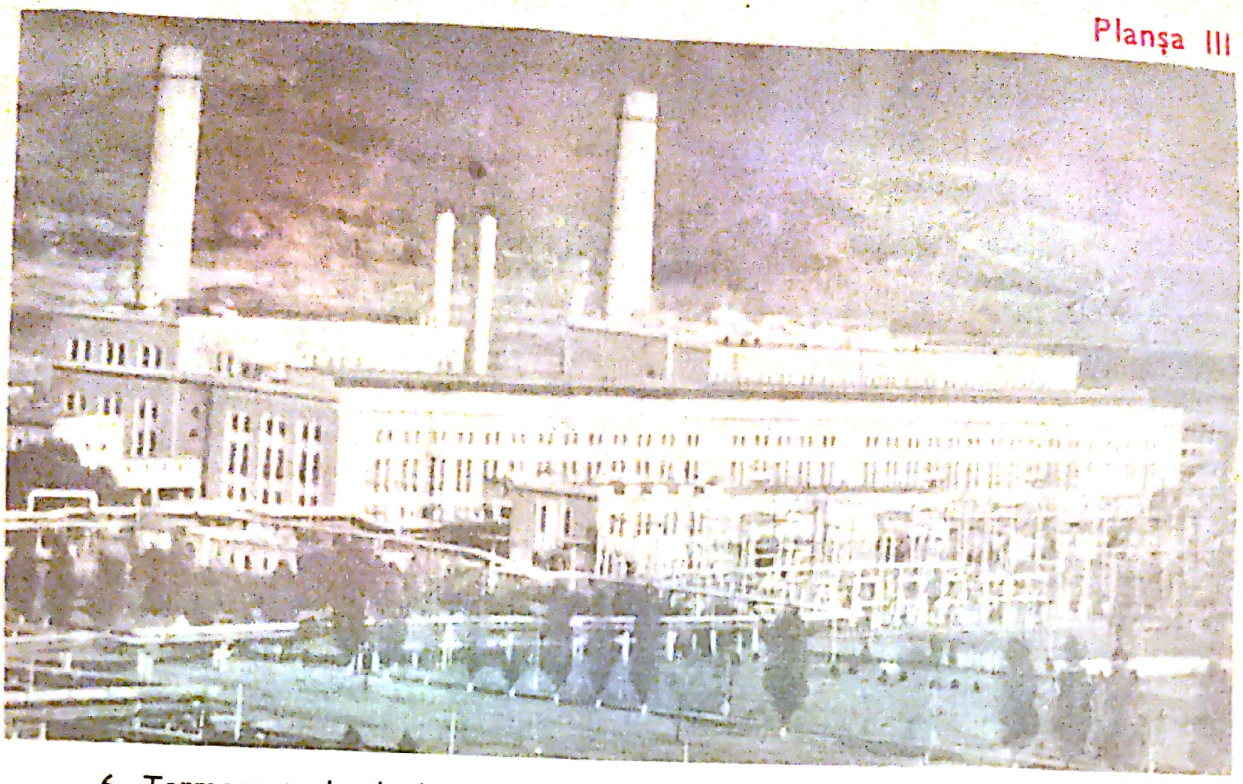


4. Transformator ridicător de tensiune la hidrocentrala „V. I. Lenin".

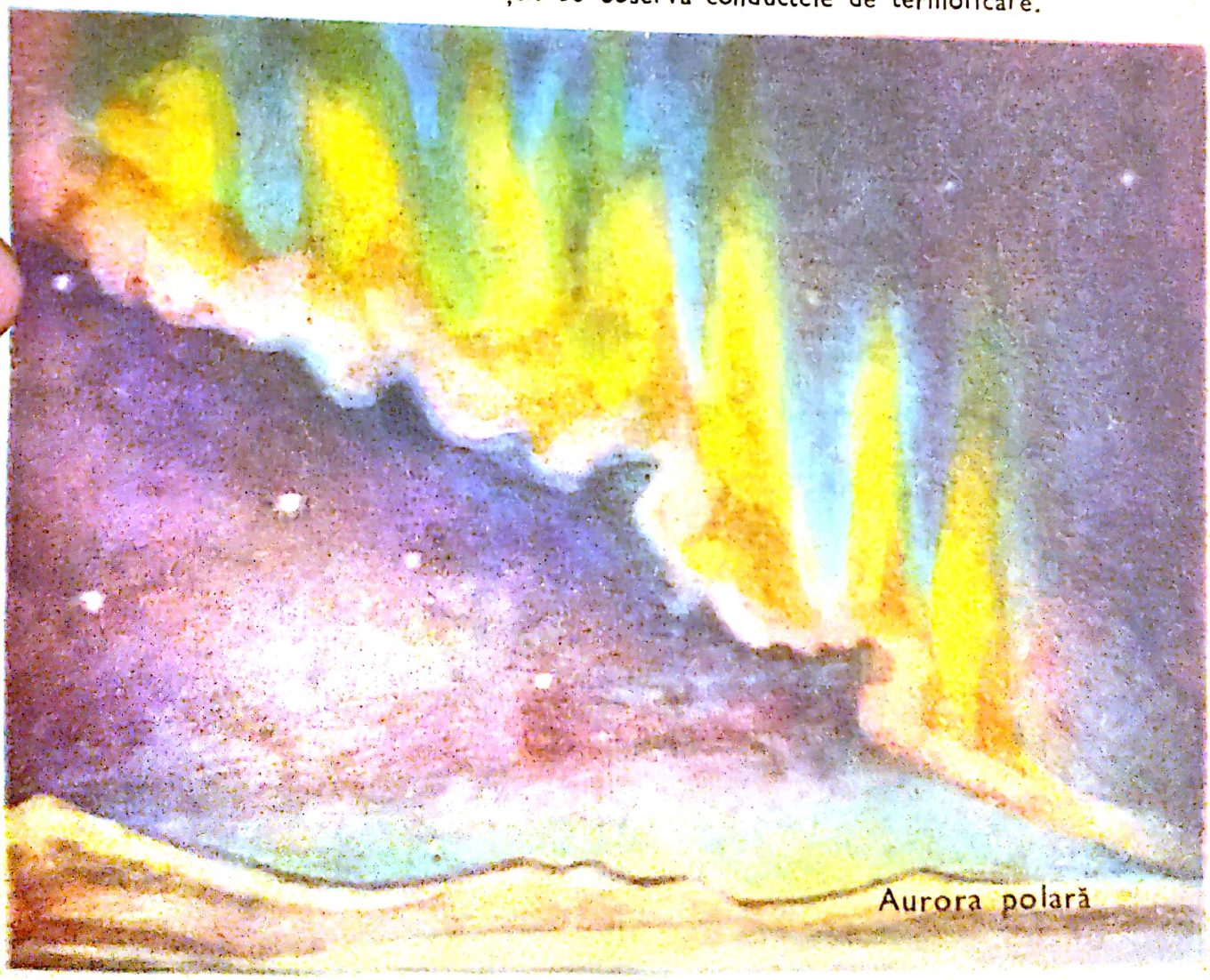


5. Clădirea hidrocentralei de la Stejaru. Se observă și o parte din canalul de fugă.

Scanned with OKEN Scanner



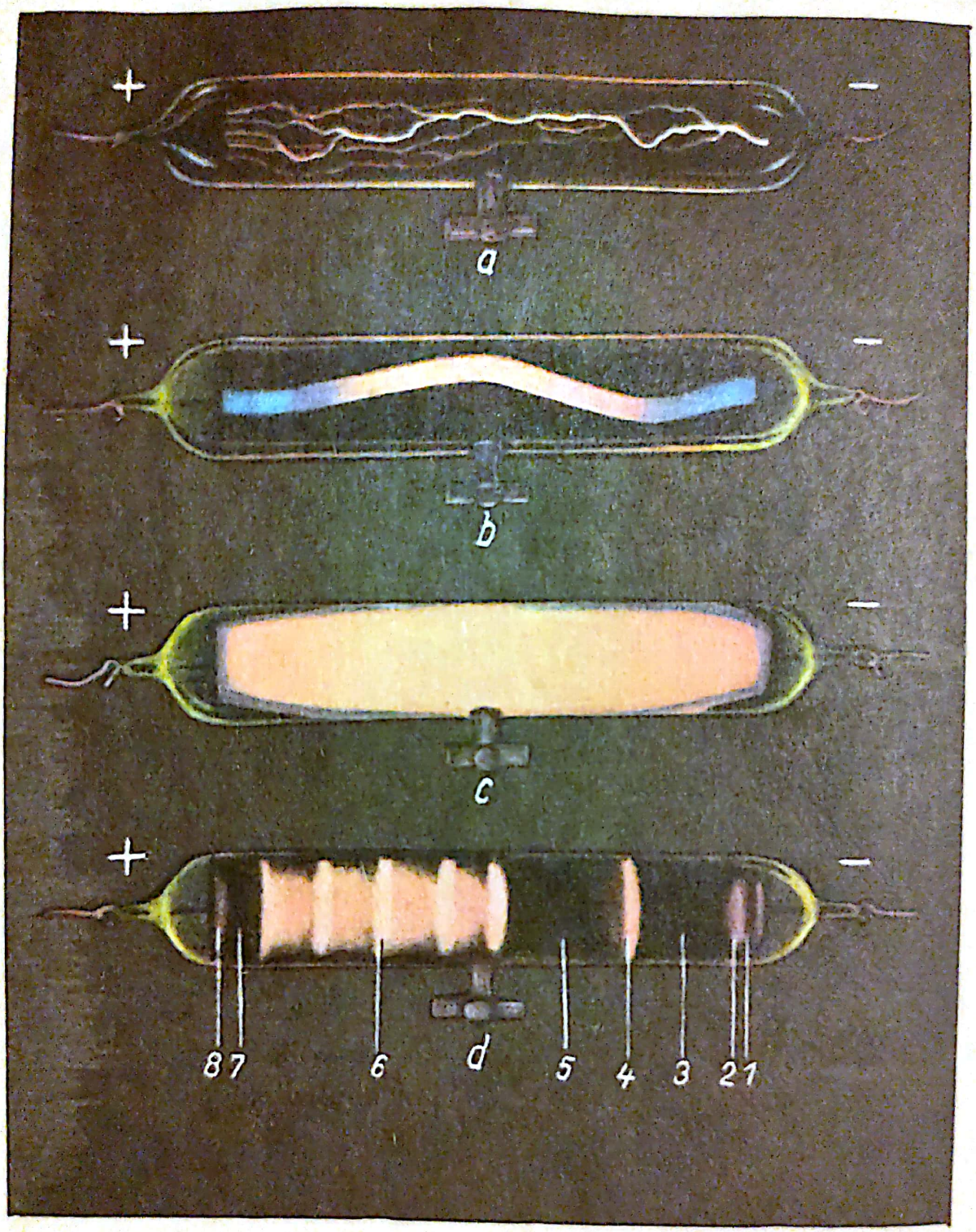
6. Termocentrala de la Borzești. Se observă conductele de termoficare.



Aurora polară

Scanned with OKEN Scanner

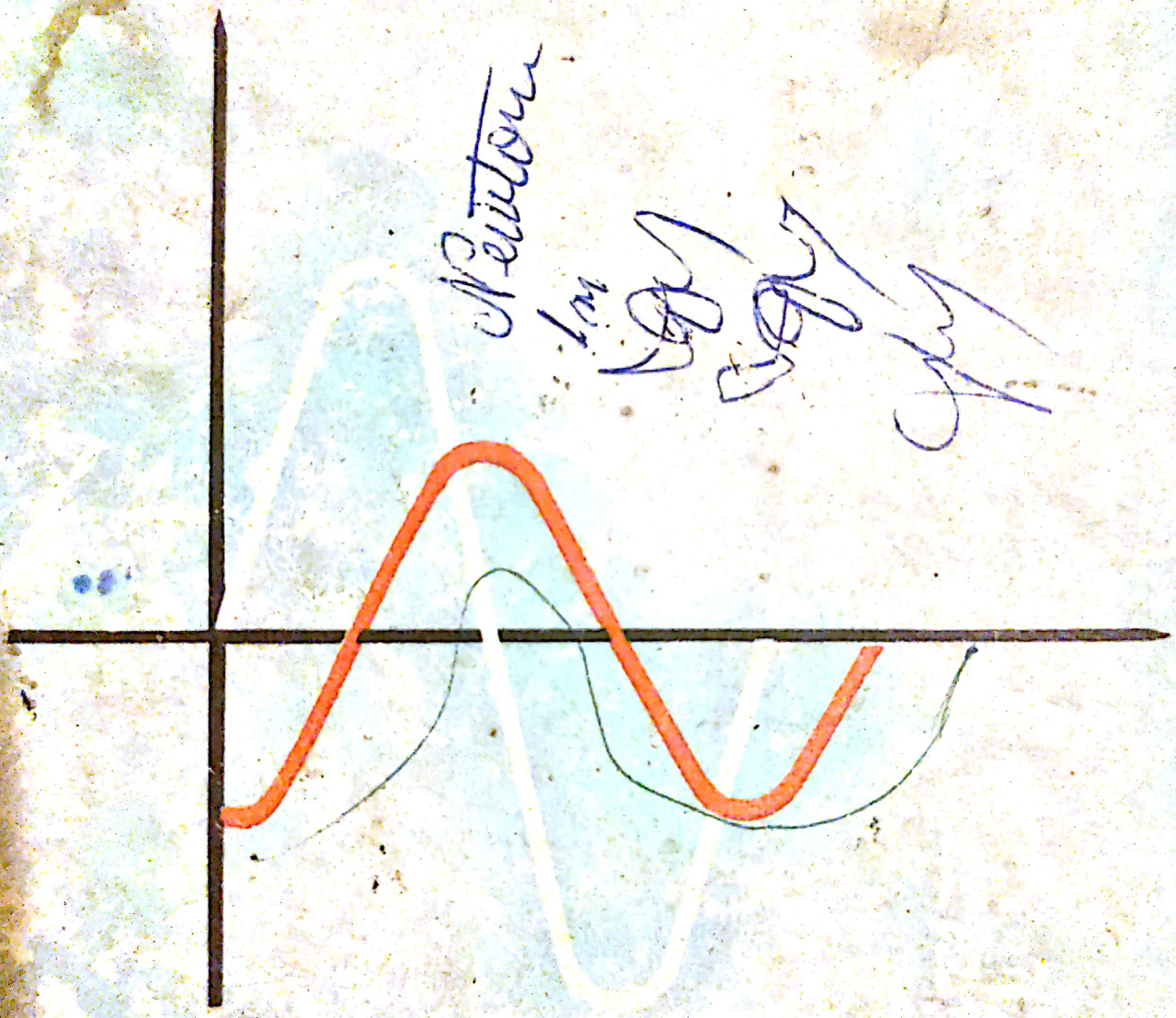
Planșa IV



Aspectul descărcărilor în gaze la presiune scăzută.

Scanned with OKEN Scanner

[redacted]40
LEI 110,40



Editura didactică și pedagogică — București, 1975

Scanned with OKEN Scanner